

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA**

TIAGO LIMA ALVES

**ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE
RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS DE MANGA (*Mangifera indica* L.) E MARACUJÁ
(*Passiflora edulis* Sims) EM REATORES ANAERÓBIOS EM BATELADA**

Rio Largo, AL

Maio/2026

TIAGO LIMA ALVES

**ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE
RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS DE MANGA (*Mangifera indica* L.) E MARACUJÁ
(*Passiflora edulis* Sims) EM REATORES ANAERÓBIOS EM BATELADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Energia do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientadora: Profa. Dra. Amanda Santana Peiter

Coorientadora: Ma. Karla de Lima Machado

Rio Largo, AL

Maio/2026

Catlogação na Fonte

Universidade Federal de Alagoas

Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias

Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 – 1512

A474e

Alves, Tiago Lima.

Estimativa do potencial de produção de metano a partir de resíduos agroindustriais de manga (*Mangifera indica* L.) e maracujá (*Passiflora edulis* Sims) em reatores anaeróbios em batelada. / Tiago Lima Alves. – 2026.

66 f.: il.

Orientador(a): Amanda Santana Peiter.

Coorientadora: Karla de Lima Machado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) –

Graduação em Engenharia de Energia, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2026.

Inclui bibliografia

1. Digestão anaeróbia. 2. Biogás. 3. Resíduos agroindustriais. 4. Biomassa lignocelulósica. 5. Pré-tratamento químico. I. Título.

CDU: 620.91

Folha de Aprovação

TIAGO LIMA ALVES

Estimativa do potencial de produção de metano a partir de resíduos agroindustriais de manga (*Mangifera indica L.*) e maracujá (*Passiflora edulis Sims*) em reatores anaeróbios em batelada

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Energia.

Aprovado em: 01/06/2026

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **AMANDA SANTANA PEITER**
Data: 03/06/2026 05:26:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Amanda Santana Peiter, CECA/UFAL (Orientadora)

Documento assinado digitalmente
 **KARLA DE LIMA MACHADO**
Data: 03/06/2026 20:45:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ma. Karla de Lima Machado (Coorientador)

Documento assinado digitalmente
 **JULIO INACIO HOLANDA TAVARES NETO**
Data: 03/06/2026 14:03:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Julio Inacio Holanda Tavares Neto, CECA/UFAL (1º Avaliador)

Documento assinado digitalmente
 **FERNANDA SANTANA PEITER**
Data: 03/06/2026 20:20:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Fernanda Santana Peiter, CTEC/UFAL (2º Avaliador)

AGRADECIMENTOS

Ao longo dessa trajetória, muitas pessoas fizeram parte da construção deste trabalho e contribuíram para meu aprendizado e amadurecimento ao longo dessa caminhada.

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me sustentado nos momentos difíceis e por permitir que eu chegasse até aqui com saúde, aprendizado e propósito.

A toda minha família, especialmente aos meus pais e irmãos, por todo amor, apoio, compreensão e incentivo ao longo dessa jornada. Obrigado por acreditarem em mim; cada conquista minha também pertence a vocês.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Amanda Santana Peiter, por toda orientação, paciência e dedicação durante o desenvolvimento deste trabalho e ao longo da minha trajetória acadêmica. Obrigado pelos ensinamentos, pela confiança e pela forma humana com que conduziu cada etapa desta pesquisa.

À minha coorientadora, Ma. Karla de Lima Machado, por toda ajuda, disponibilidade e contribuição durante este processo. Seu apoio foi essencial para a realização deste trabalho. Agradeço também à Ma. Maria Kelyane Miguel da Silva, por toda assistência, dedicação e apoio durante as atividades da pesquisa, sempre disposta a ajudar e contribuir ao longo desta caminhada.

Aos professores, Prof.^a Dr.^a Jerusa Goes Aragão Santana e Prof.^a Dr.^a Isabela C. S. Passos Tiburcio, que marcaram minha trajetória acadêmica de maneira especial, pelos ensinamentos compartilhados, pelos conselhos e pela inspiração profissional ao longo da graduação.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Júlio Holanda e Prof.^a Dr.^a Fernanda Peiter, pela disponibilidade em contribuir com este trabalho e pelas observações e sugestões que certamente enriqueceram esta pesquisa.

Aos meus amigos, especialmente à Evódia Batista, por todos os anos de amizade, apoio, companheirismo e por ter estado ao meu lado nos momentos mais importantes dessa caminhada. Também agradeço a Mikaella Duarte, Ewerton Ryan, Ivandro Joel Bueno, Pedro Ricardo, Thamyres Christina e Patrícia de Sousa. Obrigado pela parceria, companheirismo e por todos os momentos compartilhados ao longo dessa trajetória, tornando essa caminhada mais leve e inesquecível.

À Universidade Federal de Alagoas e ao Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, por toda estrutura, aprendizado e oportunidades proporcionadas durante minha formação acadêmica.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho se tornasse possível. Cada apoio, incentivo e palavra de motivação fizeram diferença nessa trajetória.

RESUMO

A crescente geração de resíduos agroindustriais e a necessidade de alternativas energéticas sustentáveis têm impulsionado pesquisas voltadas ao aproveitamento energético da biomassa residual. Nesse contexto, resíduos lignocelulósicos provenientes do processamento de frutas, como cascas de manga e maracujá, apresentam potencial para aplicação na digestão anaeróbia devido à elevada concentração de matéria orgânica biodegradável. Entretanto, a presença de lignina pode dificultar a degradação microbiológica do substrato, tornando necessária a aplicação de pré-tratamentos capazes de aumentar a disponibilidade de acesso à biomassa. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo estimar o potencial de produção de metano em reatores anaeróbios em batelada utilizando cascas de manga e maracujá submetidas a pré-tratamentos ácido e alcalino. Inicialmente, os substratos foram triturados, secos e submetidos aos tratamentos químicos utilizando soluções ácida e alcalina. Posteriormente, os materiais foram caracterizados quanto aos parâmetros físico-químicos, incluindo pH, Demanda Química de Oxigênio (DQO), carboidratos totais e sólidos totais. Em seguida, os reatores anaeróbios em batelada foram montados utilizando os substratos pré-tratados e inoculados com biomassa anaeróbia. Durante o processo, foram avaliadas as eficiências de remoção de DQO e carboidratos, além da estimativa teórica da produção de metano a partir da DQO removida. Os resultados demonstraram que a eficiência dos pré-tratamentos variou de acordo com o substrato utilizado. Para o maracujá, o pré-tratamento alcalino apresentou os melhores resultados, alcançando eficiência de remoção de DQO de 33,83% e produção estimada de 91,53 mL de CH₄. Para a manga, o melhor desempenho foi observado no pré-tratamento ácido, com eficiência de remoção de DQO de 40,68% e produção estimada de 96,35 mL de CH₄. Esses resultados evidenciam que a resposta aos pré-tratamentos está diretamente relacionada às características físico-químicas e estruturais de cada biomassa. Assim, a aplicação de pré-tratamentos químicos mostrou-se uma estratégia promissora para aumentar a biodegradabilidade de resíduos lignocelulósicos e potencializar seu aproveitamento energético em sistemas anaeróbios.

Palavras-chave: Digestão anaeróbia; biogás; resíduos agroindustriais; biomassa lignocelulósica; pré-tratamento químico.

ABSTRACT

The increasing generation of agro-industrial waste and the need for sustainable energy alternatives have driven research focused on the energy recovery of residual biomass. In this context, lignocellulosic residues from fruit processing, such as mango and passion fruit peels, show potential for application in anaerobic digestion due to their high concentration of biodegradable organic matter. However, the presence of lignin can hinder the microbiological degradation of the substrate, making it necessary to apply pretreatments capable of increasing the availability of access to biomass. Thus, this work aimed to estimate the methane production potential in batch anaerobic reactors using mango and passion fruit peels subjected to acid and alkaline pretreatments. Initially, the substrates were crushed, dried, and subjected to chemical treatments using acid and alkaline solutions. Subsequently, the materials were characterized in terms of physicochemical parameters, including pH, Chemical Oxygen Demand (COD), total carbohydrates, and total solids. Next, batch anaerobic reactors were assembled using pre-treated substrates and inoculated with anaerobic biomass. During the process, the COD and carbohydrate removal efficiencies were evaluated, in addition to the theoretical estimate of methane production from the removed COD. The results demonstrated that the efficiency of the pretreatments varied according to the substrate used. For passion fruit, the alkaline pretreatment showed the best results, achieving a COD removal efficiency of 33.83% and an estimated production of 91.53 mL of CH₄. For mango, the best performance was observed in the acidic pretreatment, with a COD removal efficiency of 40.68% and an estimated production of 96.35 mL of CH₄. These results show that the response to the pretreatments is directly related to the physicochemical and structural characteristics of each biomass. Thus, the application of chemical pretreatments has proven to be a promising strategy to increase the biodegradability of lignocellulosic waste and enhance its energy recovery in anaerobic systems.

Keywords: Anaerobic digestion; biogas; agro-industrial waste; lignocellulosic biomass; chemical pretreatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolução do número de plantas e do volume médio de produção de biogás no Brasil entre 2016 e 2025	17
Figura 2. Rotas metabólicas dos grupos de microrganismo e os respectivos produtos gerados	23
Figura 3. Pré-tratamento de compostos lignocelulósicos	30
Figura 4. Representação esquemática de um reator anaeróbio em batelada.....	34
Figura 5. Reator anaeróbio de volume total igual a 120 mL	36
Figura 6. Fluxograma do estudo	37
Figura 7. Casca de manga triturada após secagem	38
Figura 8. Casca de maracujá triturada após secagem	38
Figura 9. Misturas de substratos após tratamento químico.....	39
Figura 10. Reatores operados em batelada	42
Figura 11. Reatores incubados em câmara agitadora.....	42
Figura 12. Eficiências de remoção de DQO e carboidratos nos reatores	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição dos reatores.....	40
Tabela 2. Caracterização físico-química dos substratos e inóculo.....	45
Tabela 3. Características iniciais e finais e eficiências de remoção nos reatores	47
Tabela 4. Valores de DQO convertida em metano.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BMP	Potencial Bioquímico de Metano
BRS	Bactérias Redutoras de Sulfato
CH ₄	Metano
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CO ₂	Dióxido de Carbono
DQO	Demanda Química de Oxigênio
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
H ₂	Hidrogênio
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio
ha	Hectares
HCl	Ácido Clorídrico
HMF	Hidroximetilfurfural
N ₂	Nitrogênio
NaOH	Hidróxido de Sódio
pH	Potencial hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
ST	Sólidos Totais
STF	Sólidos Totais Fixos
STV	Sólidos Totais Voláteis
t	Tonelada
t/ha	Toneladas por hectare

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo Geral	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Contexto dos setores de biogás e biometano	15
3.2 Produção, geração de resíduos e potencial de aproveitamento de manga e maracujá para digestão anaeróbia.....	18
3.2.1 Biomassa lignocelulósica	20
3.3 Digestão anaeróbia: princípios, vantagens e etapas do processo.....	21
3.3.1 Fatores que influenciam a digestão anaeróbia.....	25
3.3.1.1 <i>Características do substrato</i>	25
3.3.1.2 <i>Inóculo</i>	26
3.3.1.3 <i>pH</i>	26
3.3.1.4 <i>Alcalinidade</i>	27
3.3.1.5 <i>DQO</i>	27
3.3.1.6 <i>Carboidratos</i>	28
3.3.1.7 <i>Influência do sulfato na digestão anaeróbia</i>	28
3.3.1.8 <i>Temperatura</i>	28
3.3.1.9 <i>Sólidos totais e sólidos voláteis</i>	29
3.4 Pré-tratamentos aplicados à biomassa lignocelulósica.....	29
3.4.1 Pré-tratamento físico.....	30
3.4.2 Pré-tratamento biológico	31
3.4.3 Pré-tratamento químico – solventes ácidos	31
3.4.4 Pré-tratamento químico – solventes alcalinos	31
3.4.5 Comparação pré-tratamento ácido e alcalino	32
3.5 Reatores anaeróbios	33
3.5.1 Reator anaeróbio em batelada.....	33
3.6 Produção de metano.....	34
3.6.1 Estimativa da produção de metano	35
4. METODOLOGIA.....	36
4.1 Substratos	38
4.2 Pré-tratamento químico	38
4.3 Inóculo	40
4.4 Caracterização dos substratos e inóculo	40

4.5	Montagem dos reatores.....	40
4.6	Análises físico-químicas.....	42
4.7	Estimativa da produção de metano.....	43
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1	Caracterização físico-química dos substratos e inóculo.....	45
5.2	Eficiência de remoção de DQO e carboidratos	47
5.3	Estimativa da produção de metano.....	50
6.	CONCLUSÃO.....	53
	REFERÊNCIAS.....	54

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, assim como em outros países, o intenso crescimento das atividades agrícolas e industriais tem contribuído para o aumento significativo da geração de resíduos orgânicos (Ferreira et al., 2018; Santos et al., 2018). Entre eles, destacam-se os resíduos agroindustriais gerados ao longo das cadeias de produção e processamento de alimentos, produzidos em grandes quantidades e que demandam estratégias adequadas de gerenciamento e valorização (Catarino; Seibel, 2016; Nascimento Filho; Franco, 2015; Oliveira, 2009).

Milhões de toneladas de resíduos agroindustriais são produzidas anualmente, sendo compostas principalmente por cascas, sementes, folhas, caules e bagaços. Quando descartados inadequadamente, esses materiais podem representar um importante passivo ambiental, favorecendo a decomposição da matéria orgânica, a geração de odores, a formação de chorume e a lixiviação de compostos capazes de contaminar o solo e os recursos hídricos superficiais e subterrâneos, além de representar riscos à saúde pública (Barros et al., 2024; Rosa et al., 2011; Santos, 2008; Sampaio et al., 2017). Dessa forma, a busca por alternativas sustentáveis para o aproveitamento desses materiais torna-se fundamental para reduzir os impactos ambientais associados à sua disposição final.

Dentre os resíduos agroindustriais, destacam-se aqueles provenientes do processamento de frutas em indústrias de sucos, polpas, óleos, néctares e outros derivados, atividades responsáveis pela geração de resíduos como cascas, sementes e bagaços (Nogueira, 2025). A produção de sucos e polpas pode gerar entre 30 e 40% de resíduos agroindustriais, os quais frequentemente são descartados apesar de apresentarem elevado potencial de aproveitamento (Filho et al., 2015; Randolpho et al., 2020). Nesse contexto, resíduos de manga (*Mangifera indica* L.) e maracujá (*Passiflora edulis* Sims) despertam interesse por apresentarem elevado teor de matéria orgânica biodegradável e potencial para aplicação em processos de conversão energética, como a digestão anaeróbia (Ngoma et al., 2015).

A crescente demanda energética fundamentada na queima de combustíveis fósseis, somada aos impactos ambientais gerados por sua combustão, tem intensificado a busca por alternativas energéticas mais sustentáveis. Nesse contexto, o biogás produzido pela digestão anaeróbia da matéria orgânica destaca-se como uma fonte renovável de energia, contribuindo tanto para a geração de energia limpa quanto para a gestão sustentável de resíduos e a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) (Vasco-Correa *et al.*, 2018).

O biogás, principal produto do processo, é composto predominantemente por metano e dióxido de carbono, além de outros gases presentes em menores concentrações (Chernicharo, 1997; FRN, 2013; Lucena, 2016; Santos, 2016; Tchobanoglous, 2002).

Além disso, a digestão anaeróbia destaca-se pela possibilidade de utilização de diferentes resíduos e subprodutos como substrato, permitindo o aproveitamento de biomassas de variadas origens. No entanto, resíduos lignocelulósicos provenientes da biomassa vegetal podem apresentar limitações durante o processo devido à presença de estruturas complexas e de difícil degradação microbiológica (Weerachanchai *et al.*, 2012).

A utilização de pré-tratamentos químicos antes da digestão anaeróbia vem sendo considerada uma alternativa eficaz para melhorar a digestibilidade da biomassa e promover a conversão da matéria orgânica em biogás (Sambusiti *et al.*, 2013; Yao; Bergeron; Davaritouhaee, 2018). Entre os métodos utilizados, os pré-tratamentos alcalinos e ácidos são os mais empregados, uma vez que conseguem causar mudanças na estrutura da biomassa lignocelulósica (Buranov; Mazza, 2008; Chandra *et al.*, 2007; Sambusiti *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2014; Yao *et al.*, 2018).

Entre os agentes alcalinos utilizados em pré-tratamentos lignocelulósicos, o hidróxido de sódio (NaOH) destaca-se por sua elevada capacidade de promover a desestruturação da matriz lignocelulósica, atuando principalmente na solubilização da lignina e na ruptura das ligações entre lignina, hemicelulose e celulose (Mussatto, 2016; Yang *et al.*, 2009). Entre os agentes ácidos, o ácido clorídrico (HCl) destaca-se por sua capacidade de promover a solubilização da hemicelulose e aumentar a acessibilidade da celulose, favorecendo os processos subsequentes de conversão biológica (Freire Neto, 2019). Conforme demonstrado por Abudi *et al.* (2016), a aplicação de pré-tratamentos químicos pode resultar em aumentos expressivos na produção de biogás e metano a partir de biomassas lignocelulósicas.

Além do pré-tratamento empregado, parâmetros operacionais, como pH e concentração de sólidos totais, podem afetar a eficiência da digestão anaeróbia (Jain *et al.*, 2015; Li; Liu Sun, 2016).

Apesar do potencial apresentado pelos resíduos agroindustriais para a produção de biogás, ainda existem limitações relacionadas à biodegradabilidade de materiais lignocelulósicos e à otimização dos processos de digestão anaeróbia.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo estimar a produção de metano a partir da DQO removida em reatores anaeróbios em batelada alimentados com resíduos de cascas de manga e maracujá submetidos a pré-tratamentos ácido e alcalino. Busca-se, assim, melhorar a digestibilidade do substrato, aumentar a produção de biogás e contribuir para o

desenvolvimento de alternativas sustentáveis voltadas à geração de energia renovável e à gestão de resíduos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estimar o potencial de produção de metano em reatores anaeróbios em batelada, utilizando como biomassa lignocelulósica as cascas de manga e maracujá.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar físico-quimicamente os substratos utilizados no processo;
- Avaliar o efeito dos pré-tratamentos ácido e alcalino nos substratos sobre a remoção de matéria orgânica (DQO) e de carboidratos durante a digestão anaeróbia;
- Estimar a produção de metano a partir da DQO removida e avaliar a influência de pré-tratamentos ácido e alcalino nos substratos sobre a produção.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Contexto dos setores de biogás e biometano

A intensificação da crise energética mundial associada às atividades antrópicas vem motivando a utilização de fontes de energia alternativas para diversificar a matriz energética e minimizar a dependência dos combustíveis fósseis (Obaideen *et al.*, 2022; Tshikalange *et al.*, 2022). O crescimento populacional aliado ao aumento das atividades humanas tem intensificado a pressão sobre os recursos naturais, tornando necessária a adoção de medidas voltadas à sustentabilidade e à preservação ambiental. Com isso, destacam-se importantes iniciativas internacionais, como o Acordo de Paris sobre Mudanças Climáticas e a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, que buscam reduzir os impactos ambientais e promover o desenvolvimento sustentável (Azha *et al.*, 2021; Raza *et al.*, 2020).

Diante desse cenário, evidencia-se a importância do aproveitamento de fontes de energia limpa e da valorização de resíduos provenientes de processos industriais e agroindustriais, buscando ampliar sua utilização e reduzir os impactos ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis e à destinação inadequada de resíduos (Glinwong; Wongchang, 2017; Meriño-Stand *et al.*, 2021; Yao *et al.*, 2018). Esses combustíveis surgem como uma alternativa sustentável frente às crises energéticas e aos problemas ambientais, contribuindo para a redução dos impactos associados ao descarte inadequado de resíduos e para a valorização de subprodutos agroindustriais por meio de sua conversão em energia renovável, em alinhamento com os princípios da economia circular (Behl *et al.*, 2023; Tiwari *et al.*, 2022).

Nesse contexto, o biogás destaca-se como uma das principais alternativas para o aproveitamento energético de resíduos orgânicos, podendo ser gerado a partir da biomassa disponível e contribuindo para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, como o metano proveniente da decomposição da matéria orgânica e o dióxido de carbono resultante da queima de combustíveis fósseis (Kefalew *et al.*, 2021; Kumar *et al.*, 2022; Shanmugam *et al.*, 2021).

O aproveitamento energético do biogás vem ganhando destaque mundial devido ao seu potencial de contribuir para a segurança energética e para a redução dos impactos ambientais. Em 2023, a produção global de biogás e biometano atingiu aproximadamente 50 bilhões de metros cúbicos equivalentes de gás natural, sendo a Europa a principal região produtora, seguida pela China e pelos Estados Unidos. O biogás é utilizado principalmente para geração de calor e eletricidade, além de aplicações em cocção limpa. Paralelamente, a produção de biometano tem apresentado crescimento acelerado, impulsionada pelo potencial desse

combustível em substituir parcialmente o gás natural fóssil, sendo que aproximadamente 20% do volume global de biogás produzido é destinado à produção de biometano (IEA, 2025).

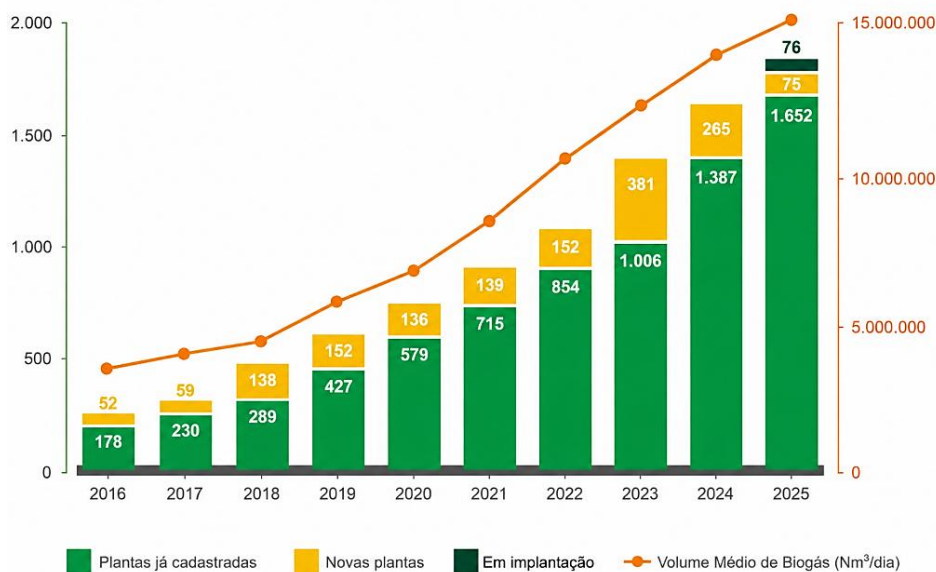
Entre os produtos derivados do biogás, destaca-se o biometano, que apresenta elevada concentração de metano e pode ser obtido por meio da purificação do biogás ou da gaseificação da biomassa (IEA, 2021). A purificação do biogás, processo conhecido como *upgrading*, consiste na remoção de dióxido de carbono e de outros gases indesejáveis, elevando a concentração de metano para valores entre 80 e 99% (Ferraz Junior et al., 2022). Segundo estimativas mundiais, caso todo o biogás produzido globalmente fosse convertido em biometano por meio desse processo, seria possível suprir cerca de 20% da demanda mundial de gás natural (IGU, 2021).

No cenário brasileiro, observa-se elevado potencial para a expansão do setor de biogás e biometano. Dados recentes indicam avanço significativo da cadeia produtiva nacional, com 1.727 plantas de biogás em operação e produção aproximada de 4,96 bilhões de Nm³ por ano em 2025. Nos últimos cinco anos, o setor apresentou crescimento médio anual de 15% no número de plantas e de 13% no volume de biogás produzido, evidenciando a ampliação do aproveitamento energético de resíduos orgânicos no país (CIBiogás, 2026).

A expansão do setor de biogás no Brasil está associada à diversificação das fontes geradoras utilizadas para sua produção. Segundo Ramalho (2023), a cadeia produtiva nacional envolve diferentes segmentos, incluindo agroindústrias, aterros sanitários, estações de tratamento de esgoto (ETE) e usinas sucroenergéticas, demonstrando a versatilidade dessa tecnologia e seu potencial para o aproveitamento energético de diferentes tipos de resíduos orgânicos.

A Figura 1 apresenta a evolução do número de plantas e do volume médio de biogás produzido no Brasil entre 2016 e 2025 (CIBiogás, 2026), evidenciando a expansão contínua da cadeia produtiva nacional ao longo da última década.

Figura 1. Evolução do número de plantas e do volume médio de produção de biogás no Brasil entre 2016 e 2025



Fonte: Adaptado de CIBIOGÁS (2026)

Verifica-se ainda que a expansão do setor ocorreu de forma contínua ao longo da última década, com crescimento significativo no número de unidades produtoras e no volume de biogás gerado. O ano de 2023 registrou o maior número de novas plantas em operação, indicando o fortalecimento do mercado brasileiro e o aumento dos investimentos na área (CIBIOGÁS, 2026).

Esse cenário de crescimento também se reflete no potencial identificado em diferentes estados brasileiros. No contexto alagoano, observa-se elevado potencial para o aproveitamento energético de resíduos orgânicos. Dados da Associação Brasileira do Biogás e do Biometano indicam que o estado possui potencial estimado de produção de 3.320.778,20 Nm³/dia de biogás e 1.799.287,87 Nm³/dia de biometano, evidenciando as oportunidades para expansão dessa fonte renovável na matriz energética estadual (ABiogás, 2025). Esse potencial reforça a importância do desenvolvimento de pesquisas voltadas ao aproveitamento energético de resíduos agroindustriais disponíveis na região, incluindo aqueles provenientes do processamento de frutas.

3.2 Produção, geração de resíduos e potencial de aproveitamento de manga e maracujá para digestão anaeróbia

O Brasil ocupa posição de destaque no setor mundial da fruticultura, sendo o terceiro maior produtor de frutas do mundo, atrás apenas da China e da Índia. Além da relevância produtiva, o setor emprega cerca de 16% da mão de obra do agronegócio brasileiro, evidenciando sua importância econômica e social. Em 2023, as exportações brasileiras de frutas somaram US\$ 1,35 bilhão, representando o maior valor da série histórica e demonstrando o crescimento e a consolidação da fruticultura nacional (Brasil, 2024).

O aumento da produção e do processamento de frutas também resulta na geração de grandes quantidades de resíduos orgânicos, como cascas, sementes e partes não comercializadas. Esses resíduos apresentam elevada concentração de matéria orgânica biodegradável, o que evidencia seu potencial de aproveitamento como substrato alternativo para a produção de biogás e biometano por meio da digestão anaeróbia. (Brasil, 2024).

Como consequência do crescimento da produção agrícola e agroindustrial, torna-se necessária a adoção de práticas adequadas para o gerenciamento de resíduos orgânicos. Diante disso, os resíduos agrícolas passaram a receber maior atenção no cenário nacional, sendo abordados pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Lei nº 12.305/2010), que estabelece diretrizes para o gerenciamento e a destinação adequada desses materiais. Os resíduos de frutas em decomposição são classificados como matéria orgânica e necessitam de manejo adequado, uma vez que sua disposição inadequada pode ocasionar diversos impactos ambientais. Entre os principais efeitos destacam-se a emissão de gases de efeito estufa e outros poluentes atmosféricos decorrentes da decomposição da matéria orgânica, a geração de lixiviado (chorume) e a consequente contaminação do solo e dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos (Risqi; Budiastuti; Rosariastuti, 2023; Rosa et al., 2011).

Entre as frutas mais produzidas e processadas no Brasil, destaca-se o maracujá (*Passiflora edulis* Sims) uma fruta tropical amplamente cultivada em regiões equatoriais e subtropicais, sendo o Brasil o maior produtor mundial dessa cultura (IBGE, 2023). Sua elevada capacidade de adaptação às condições climáticas tropicais, associada ao curto ciclo produtivo, torna essa cultura de grande importância econômica e social, especialmente para pequenos e médios produtores rurais (Meletti, 2011; Santos *et al.*, 2022).

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística referentes ao ano de 2023, citados por Jesus, Lima e Oliveira (2025), a produção brasileira de maracujá foi de aproximadamente 711.278 toneladas, distribuídas em uma área de cerca de 45.716 ha, com

produtividade média de 15,54 t/ha. Entre as macrorregiões brasileiras, o Nordeste destaca-se como o maior produtor, sendo responsável por aproximadamente 69,8% da produção nacional, com destaque para os estados da Bahia e do Ceará, que juntos respondem por cerca de 57,36% da produção brasileira (Jesus; Lima; Oliveira, 2025). Em Alagoas, a produção de maracujá alcançou aproximadamente 15.579 toneladas em 2024, distribuídas em uma área colhida de 1.271 hectares, evidenciando a relevância dessa cultura para o estado e seu potencial como fonte de biomassa residual para aproveitamento energético (IBGE, 2024).

O elevado volume de produção de maracujá gera quantidades significativas de resíduos ao longo da cadeia produtiva, especialmente durante o processamento industrial para obtenção de sucos e polpas. Estima-se que entre 40 e 60% da massa processada da fruta seja convertida em resíduos constituídos principalmente por cascas, sementes e polpa residual, podendo atingir cerca de 50% da massa total da matéria-prima utilizada (Cypriano *et al.*, 2017). Além do grande volume gerado, esses resíduos apresentam características favoráveis ao aproveitamento energético. A casca de maracujá apresenta aproximadamente 10% de sólidos totais (ST) e 90% de sólidos voláteis (SV), indicando elevada fração orgânica biodegradável e potencial para processos de conversão biológica, como a digestão anaeróbia (Santos *et al.*, 2021). Resíduos fibrosos ricos em matéria orgânica, como os descritos nesse estudo, apresentam potencial para aplicação em processos de digestão anaeróbia, uma vez que elevados teores de fração orgânica estão diretamente relacionados ao aumento do potencial de produção de biogás e metano.

Além do maracujá, outras frutas amplamente produzidas no Brasil também apresentam potencial para aproveitamento energético de seus resíduos. Nesse contexto, destaca-se a manga (*Mangifera indica* L.) que está entre as frutas tropicais mais produzidas no mundo, sendo amplamente cultivada em regiões tropicais e subtropicais. No Brasil, destaca-se entre as principais frutíferas cultivadas no país. Em 2024, a área plantada foi de aproximadamente 86,5 mil hectares, concentrada principalmente na região Nordeste, responsável por cerca de 78,5% da área cultivada nacional. Entre os principais estados produtores destacam-se Bahia, Pernambuco e São Paulo, evidenciando a relevância econômica dessa cultura em diferentes regiões brasileiras (Lima, 2025).

Em termos de produção, o Brasil produziu cerca de 1,84 milhão de toneladas de manga em 2024, sendo aproximadamente 82% provenientes da região Nordeste. O Vale do São Francisco consolidou-se como a principal região produtora do país, responsável por cerca de 67,5% da produção nacional (Lima, 2025). Em Alagoas, a produção atingiu aproximadamente 9.201 toneladas em 2024, distribuídas em uma área colhida de 1.146 hectares, evidenciando a participação da cultura na geração de biomassa residual disponível no estado (IBGE, 2024).

A expressiva produção dessa cultura resulta na geração de biomassa residual ao longo da cadeia produtiva, especialmente durante as etapas de processamento e comercialização. Durante o processamento industrial, a casca pode representar entre 15 e 20% do peso total da fruta, podendo tornar-se um passivo ambiental quando descartada inadequadamente (Ambrose *et al.*, 2020; Sanchez-Camargo *et al.*, 2019).

Ensaios de potencial bioquímico de metano utilizando resíduos de manga como substrato indicaram produção aproximada de 410 L CH₄/kg de sólidos voláteis, evidenciando elevado potencial energético desse resíduo (Suryawanshi *et al.*, 2013). Além disso, resíduos com elevado teor de carboidratos podem apresentar potencial de geração de metano entre 226 e 599 mL CH₄/g de sólidos voláteis, demonstrando a relevância desse tipo de substrato para o processo anaeróbio (Slopiecka *et al.*, 2022).

3.2.1 Biomassa lignocelulósica

A crescente demanda por matérias-primas renováveis, neutras em carbono e capazes de substituir combustíveis fósseis em diferentes aplicações industriais tem impulsionado a busca por fontes alternativas de biomassa (Lopez *et al.*, 2023). A biomassa lignocelulósica destaca-se por ser um material vegetal abundante e renovável, composto principalmente por celulose, hemicelulose e lignina (Abolore *et al.*, 2024). Dentre esses componentes, a celulose constitui o principal componente das paredes celulares vegetais e representa a fonte mais abundante de polissacarídeos renováveis no meio ambiente (Sharma *et al.*, 2019).

A composição da biomassa lignocelulósica varia conforme a origem e as propriedades do material vegetal. De acordo com Abolore *et al.* (2024), a fração de celulose pode representar entre 23 e 50% da composição total da biomassa, enquanto a hemicelulose corresponde entre 12 e 29% e a lignina entre 13 e 31%. Estruturalmente, a celulose é formada por longas cadeias lineares compostas por unidades repetitivas de β -D-glucopiranosose ligadas por ligações β -(1,4)-glicosídicas. Essas cadeias organizam-se em microfibrilas responsáveis pela rigidez mecânica da parede celular vegetal (Zoghلامي; Paës, 2019).

Rejeitos agroindustriais oriundos do processamento de frutas, principalmente cascas e materiais vegetais descartados, apresentam potencial para aplicação em processos biotecnológicos devido à presença de compostos orgânicos passíveis de conversão biológica (Silva *et al.*, 2019). A caracterização da casca de maracujá realizada por Silva *et al.* (2019) evidenciou teores aproximados de 25,4% de celulose, 11,8% de hemicelulose e 4,9% de lignina, demonstrando a presença dos principais constituintes da biomassa lignocelulósica em resíduos

agroindustriais. Além disso, os autores observaram potencial para produção de biogás com concentrações de metano em torno de 64%, evidenciando o potencial energético desse resíduo.

De forma semelhante, resíduos da manga também apresentam potencial para aplicação em processos de digestão anaeróbia. A casca da manga possui elevado teor de carboidratos, correspondente a 88,9% de sua composição, além de 1,8% de lipídios e 5,1% de proteínas, características que favorecem sua biodegradação (Luna-Avelar *et al.*, 2021).

Ismail *et al.* (2025) observaram na casca de manga teores de 12,02% de hemicelulose, 17,02% de celulose e 10,0% de lignina, demonstrando o caráter lignocelulósico desse resíduo agroindustrial e seu potencial para aplicação em processos de conversão energética, como a produção de biogás e biometano.

De forma semelhante, Abudi et al. (2019) verificaram que sistemas utilizando folhas de manga e operando com 8% de sólidos totais apresentaram melhor desempenho em relação às demais concentrações avaliadas (4%, 6% e 10%), alcançando teor diário máximo de metano de 72%, o que evidencia a influência da concentração de sólidos totais sobre a eficiência da digestão anaeróbia, uma vez que essa condição proporcionou maior estabilidade ao processo e maiores rendimentos de biogás e metano.

Embora a biomassa lignocelulósica apresente elevado potencial energético, seu aproveitamento pode ser limitado pela alta complexidade estrutural desses materiais. Na parede celular vegetal, a celulose encontra-se associada à hemicelulose e à lignina, formando uma matriz complexa que dificulta a degradação e a extração dos componentes estruturais (Abolore *et al.*, 2024). Essa organização é considerada uma das principais causas da resistência à degradação da biomassa, reduzindo a acessibilidade da celulose à hidrólise (McCann; Carpita, 2015).

Além disso, fatores como elevado teor de lignina e alta cristalinidade da celulose também podem limitar o aproveitamento energético desses materiais (Silva *et al.*, 2019). Dessa forma, tornam-se necessárias etapas de pré-tratamento capazes de promover a solubilização parcial da lignina e da hemicelulose, reduzindo a complexidade da biomassa e favorecendo sua biodegradabilidade.

3.3 Digestão anaeróbia: princípios, vantagens e etapas do processo

A digestão anaeróbia é um processo biológico que ocorre na ausência de oxigênio, no qual a matéria orgânica é degradada pela ação de diferentes grupos de microrganismos. Trata-se de processo metabólico sequencial envolvendo principalmente bactérias fermentativas/

acidogênicas, bactérias acetogênicas e arqueias metanogênicas (De Farias Silva *et al.*, 2019; Cremonese *et al.*, 2021; Karki *et al.*, 2021).

Além da conversão biológica da matéria orgânica, a digestão anaeróbia exerce papel importante no tratamento e na valorização de resíduos orgânicos. Conforme Bella e Rao (2023), essa tecnologia apresenta elevada capacidade de estabilização de resíduos, aliada à geração de energia por meio da produção de biogás. Assim, além de contribuir para o tratamento de resíduos orgânicos, o processo também possibilita o aproveitamento do potencial energético presente nesses materiais

Durante o processo, são gerados biogás e digestato. O biogás é constituído principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), podendo conter ainda pequenas quantidades de nitrogênio (N_2), hidrogênio (H_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3) e vapor d'água (Neshat *et al.*, 2017). O digestato resultante do processo pode ser aplicado como biofertilizante, ou seja, isso pode ajudar na confirmação do valor agregado do resíduo tratado.

Diversos estudos apontam a digestão anaeróbia como uma alternativa sustentável e economicamente viável para o tratamento e a recuperação de resíduos agroindustriais. Essa tecnologia contribui para a redução do descarte inadequado de resíduos, das emissões de gases de efeito estufa, da dependência de combustíveis fósseis e dos impactos ambientais associados aos processos produtivos, além de possibilitar a geração de energia renovável por meio do biogás (Wu *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2021a).

Entre as principais vantagens do biogás, destaca-se sua aplicação em diferentes escalas de produção, desde sistemas de pequeno porte até grandes usinas, além da obtenção de um combustível gasoso renovável (Silva *et al.*, 2021). Nesse contexto, a digestão anaeróbia apresenta-se como uma alternativa viável para o tratamento de resíduos agroindustriais de frutas, permitindo a geração de energia e a produção de digestato com potencial de aplicação agrícola (Santos *et al.*, 2019).

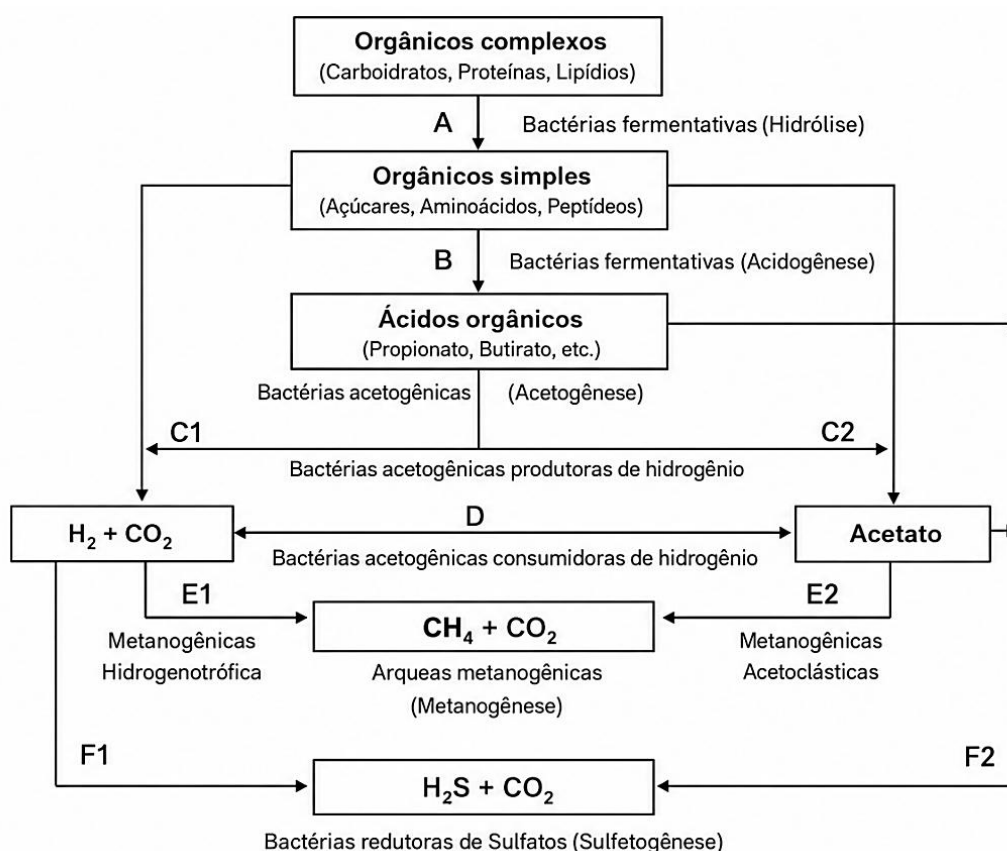
Dados do CIBiogás divulgados por Ramalho (2023) mostram que a produção brasileira de biogás mais que dobrou nos últimos cinco anos, alcançando 2,88 bilhões de m^3 por ano destinados ao aproveitamento energético em 2022. Esse volume representa crescimento de aproximadamente 110% em relação a 2018. Além disso, o país contava com 885 instalações de produção de biogás distribuídas entre agroindústrias, aterros sanitários, estações de tratamento de águas residuais e usinas sucroenergéticas. Esses dados evidenciam o crescimento da cadeia produtiva do biogás no Brasil e reforçam o potencial da digestão anaeróbia como tecnologia estratégica para o aproveitamento energético de resíduos orgânicos.

Diversos estudos têm investigado o potencial fermentativo de frutas e hortaliças como substratos para digestão anaeróbia, destacando a eficiência dessa tecnologia na conversão de resíduos orgânicos em energia na forma de biogás (Forgacs *et al.*, 2012; Carvalho *et al.*, 2017; Santos *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2019).

O processo de biodigestão consiste em uma sequência de processos bioquímicos realizados por diferentes grupos microbianos que atuam de forma integrada na degradação da matéria orgânica complexa. Esse processo está associado a elevado rendimento energético (Chernicharo, 2016; Kirk; Gould, 2020). Conforme ilustrado na Figura 2, a digestão anaeróbia pode ser dividida em diferentes etapas incluindo hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, sendo cada uma conduzida por grupos específicos de microrganismos.

Além disso, na presença de compostos sulfurados no meio, pode ocorrer a rota alternativa da sulfetogênese, uma via metabólica realizada por bactérias redutoras de sulfato (BRS) que competem com os microrganismos metanogênicos pelos substratos (Muyzer; Stams, 2008).

Figura 2. Rotas metabólicas dos grupos de microrganismo e os respectivos produtos gerados



Fonte: Adaptado de Lima (2016)

A hidrólise corresponde à etapa inicial da digestão anaeróbia, na qual compostos orgânicos complexos, como carboidratos, proteínas e lipídeos, são convertidos em moléculas menores e solúveis, incluindo açúcares, aminoácidos e ácidos graxos. Esse processo ocorre pela ação de bactérias anaeróbias capazes de produzir enzimas extracelulares responsáveis pela degradação dessas macromoléculas (Chezeau; Benoit; Vial, 2019).

Em biomassas lignocelulósicas, a presença de lignina pode dificultar a biodegradação devido à sua estrutura recalcitrante, atuando como uma barreira física à ação microbiana. Dessa forma, a aplicação de pré-tratamentos físicos, térmicos ou químicos pode aumentar a disponibilidade do substrato e favorecer a eficiência da digestão anaeróbia (Kim *et al.*, 2003)

Após a hidrólise, ocorre a acidogênese, etapa na qual os compostos solúveis são convertidos em ácidos orgânicos, álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono pela ação de bactérias fermentativas. Os produtos gerados nessa fase são posteriormente consumidos por bactérias acetogênicas e arqueias metanogênicas, que participam da conversão desses compostos ao longo da digestão anaeróbia (Chernicharo, 2007).

Na etapa acetogênica, os intermediários formados durante a acidogênese são convertidos em acetato, dióxido de carbono e hidrogênio por bactérias acetogênicas. Esses compostos constituem os principais substratos utilizados pelas arqueias metanogênicas na produção de metano nas etapas finais do processo anaeróbio (Martins, 2023).

A metanogênese corresponde à etapa final da digestão anaeróbia, na qual diferentes grupos de arqueias metanogênicas atuam sobre os compostos gerados nas fases anteriores do processo. As arqueias metanogênicas acetoclásticas utilizam principalmente acetato como substrato e são responsáveis por cerca de 70% da produção de metano. Já as arqueias metanogênicas hidrogenotróficas utilizam hidrogênio (H_2) como doador de elétrons e dióxido de carbono (CO_2) como acceptor contribuindo com aproximadamente 30% da produção de metano (Gois, 2017; Oliveira; Higarashi, 2006).

Paralelamente, esses compostos também podem ser utilizados na sulfetogênese, processo no qual bactérias redutoras de sulfato consomem acetato e hidrogênio, competindo com as arqueias metanogênicas pelos substratos disponíveis e, conseqüentemente, reduzindo a produção de metano. Apesar disso, essas bactérias apresentam elevada eficiência na remoção de matéria orgânica. Além disso, a redução de sulfatos e sulfitos resulta na formação de sulfeto de hidrogênio (H_2S), gás associado à emissão de odores, à corrosão de materiais e a efeitos tóxicos sobre o sistema anaeróbio (Chernicharo, 2007).

3.3.1 Fatores que influenciam a digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia pode ser influenciada positiva ou negativamente por diferentes fatores operacionais e ambientais, tornando necessário o controle adequado das condições do sistema para garantir a estabilidade do processo. Entre os grupos microbianos envolvidos, as arqueias metanogênicas destacam-se pela maior sensibilidade às variações ambientais, podendo ter sua atividade comprometida em situações de desequilíbrio operacional. A redução da atividade desses microrganismos favorece o acúmulo de ácidos orgânicos voláteis e compromete a produção de biogás (Chernicharo, 2015).

Entre os principais fatores que influenciam a digestão anaeróbia destacam-se pH, alcalinidade, ácidos voláteis, temperatura, disponibilidade de nutrientes, presença de compostos tóxicos, características físico-químicas do substrato, pré-tratamento aplicado e condições operacionais do biodigestor (Chernicharo, 2015).

3.3.1.1 Características do substrato

A presença de fontes adequadas de carbono e nutrientes no substrato é essencial para uma biodegradação eficiente. O tipo e a composição do material influenciam diretamente a produção de biogás, uma vez que os microrganismos anaeróbios necessitam de energia para o metabolismo, fonte de carbono para síntese celular e elementos inorgânicos essenciais, como nitrogênio, fósforo, enxofre, potássio, cálcio e magnésio, além de nutrientes orgânicos importantes para o crescimento e a reprodução microbiana no sistema (Garba, 2020).

A alimentação do sistema anaeróbio é frequentemente expressa por parâmetros como demanda química de oxigênio (DQO) e sólidos voláteis totais (SVT). Assim, torna-se importante distinguir a fração efetivamente biodegradável do material introduzido no sistema da carga total alimentada, uma vez que parte do substrato pode apresentar baixa ou nenhuma biodegradabilidade em condições anaeróbias. De maneira geral, o termo “substrato” está relacionado especificamente à fração passível de degradação biológica (Zhang *et al.*, 2010).

Durante a degradação, o consumo contínuo de nutrientes pode levar ao esgotamento de elementos essenciais ao metabolismo microbiano, comprometendo a eficiência da digestão anaeróbia. Por outro lado, concentrações excessivas desses nutrientes também podem prejudicar a atividade microbiana e reduzir o desempenho do sistema (Ravendran *et al.*, 2019).

3.3.1.2 Inóculo

O inóculo utilizado influencia diretamente o desempenho da digestão anaeróbia, principalmente em sistemas que utilizam substratos complexos. A adaptação prévia dos microrganismos ao meio pode facilitar a degradação da matéria orgânica e reduzir o tempo necessário para estabilização do processo. Condições adequadas de inoculação também contribuem para melhor desempenho microbiano e maior eficiência da biodigestão (Dechruga; Kantachote; Chaiprapat, 2013; Sood *et al.*, 2011).

A escolha do inóculo também influencia a taxa de produção de biogás e a concentração de metano obtida no processo. Estudos relatam efeitos sobre a velocidade de degradação do substrato, redução da fase de latência, atividade enzimática e estrutura da comunidade microbiana, além de alterações em parâmetros físico-químicos, como sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), pH e relação carbono/nitrogênio (C/N) (Gu *et al.*, 2014; Quintero *et al.*, 2012; Suksong *et al.*, 2019).

Durante a fase inicial da digestão anaeróbia, o inóculo auxilia no estabelecimento da atividade microbiana, favorecendo o crescimento dos microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica e contribuindo para a estabilidade do sistema (Demichelis *et al.*, 2022; Gu *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2014b).

3.3.1.3 pH

O pH exerce influência direta sobre a digestão anaeróbia, podendo afetar significativamente a produção de biogás quando fora da faixa adequada. Microrganismos metanogênicos apresentam elevada sensibilidade a variações desse parâmetro, e valores muito baixos podem comprometer sua atividade. Lay, Lee e Noike (1999) observaram inibição da metanogênese em pH 4,5, associando esse comportamento à redução da atividade de enzimas envolvidas no processo. Estudos mais recentes confirmam que desvios significativos da faixa de neutralidade afetam negativamente a atividade das arqueias metanogênicas e reduzem a produção de metano (Rincon-Perez *et al.*, 2021).

Zhang *et al.* (2019) verificaram que o ajuste inicial do pH para 7,5 proporcionou melhor desempenho na produção de metano, resultado associado ao aumento da capacidade tamponante do sistema. Essa condição contribuiu para evitar o acúmulo excessivo de ácidos graxos voláteis, que podem prejudicar a etapa metanogênica. Na ausência da correção inicial

do pH, pode ocorrer acidificação do reator, elevando a concentração desses compostos e reduzindo a atividade das arqueias metanogênicas (Montanes; Pérez; Solera, 2014).

3.3.1.4 Alcalinidade

A alcalinidade corresponde à capacidade do meio de neutralizar ácidos e resistir a variações de pH, exercendo importante função tamponante na digestão anaeróbia. Dessa forma, contribui para a estabilidade do sistema ao minimizar oscilações na concentração de dióxido de carbono (CO_2) e ácidos graxos voláteis, evitando condições que possam comprometer a atividade das arqueias metanogênicas e causar desequilíbrios no processo anaeróbio (Barcelos, 2009; Magalhães, 1986; Oliveira; Lopez, 2012).

Para manter a estabilidade do processo, compostos alcalinos como bicarbonatos e carbonatos podem ser adicionados ao sistema para neutralizar os ácidos produzidos durante a digestão anaeróbia. A manutenção da capacidade tampão é considerada fundamental para prevenir a acidificação do reator e garantir a continuidade da produção de metano (Harirchi et al., 2022; Hu et al., 2024).

Em reatores anaeróbios, a alcalinidade é amplamente utilizada como indicador de estabilidade operacional, sendo recomendada a manutenção de níveis suficientes para neutralizar os ácidos graxos voláteis produzidos durante o processo e preservar a atividade metanogênica (Elazhar et al., 2022; Zainal et al., 2022).

3.3.1.5 DQO

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) é um parâmetro utilizado para estimar a quantidade de matéria orgânica presente em uma amostra por meio da quantidade de oxigênio necessária para a oxidação química desses compostos. Os resultados são expressos em miligramas de oxigênio por litro ($\text{mg O}_2/\text{L}$), sendo amplamente utilizados na caracterização de efluentes e no monitoramento de sistemas biológicos de tratamento (APHA 5220/2017; NBR 9896/1993).

Na digestão anaeróbia, a DQO também pode ser utilizada como indicador do potencial de conversão da matéria orgânica em metano. Isso ocorre porque existe relação estequiométrica entre a remoção da DQO e a produção teórica de metano no sistema anaeróbio. De acordo com essa relação, a conversão de 64 g de DQO removida corresponde à produção de 16 g de CH_4 . Em condições normais de temperatura e pressão, esse valor equivale teoricamente a aproximadamente 350 mL de CH_4 por g de DQO removida, sendo amplamente utilizado como

referência para estimativas teóricas de produção de metano em sistemas anaeróbios (Lima, 2016).

3.3.1.6 Carboidratos

Os carboidratos desempenham um papel fundamental na digestão anaeróbia, pois estão entre as frações mais facilmente biodegradáveis da matéria orgânica. Na fase de hidrólise, esses compostos são decompostos em moléculas mais simples, como açúcares, que serão utilizados pelos microrganismos em estágios posteriores do processo. Além disso, a presença de carboidratos influencia diretamente o desenvolvimento microbiano e a produção de biogás, com implicações tanto na estabilidade quanto no desempenho do sistema anaeróbio (GUERI et al., 2018).

3.3.1.7 Influência do sulfato na digestão anaeróbia

A presença de sulfato em sistemas anaeróbios pode favorecer a sulfetogênese, processo realizado por bactérias redutoras de sulfato que competem com as arqueias metanogênicas pelos substratos disponíveis. Como consequência, pode ocorrer redução da produção de metano e alteração do equilíbrio microbiológico do sistema anaeróbio (Colleran *et al.*, 1995; Muyzer; Stams, 2008).

Além da competição por substratos, a redução do sulfato resulta na formação de sulfeto de hidrogênio (H_2S), composto associado à corrosão de materiais, emissão de odores desagradáveis e efeitos tóxicos sobre microrganismos metanogênicos (Garcia, 2018).

Concentrações elevadas de sulfeto podem comprometer a atividade das arqueias metanogênicas e reduzir o rendimento de metano no sistema anaeróbio (Barrera *et al.*, 2014; Maillacheruvu *et al.*, 1993; Overmeire; Lens; Verstraete, 1994).

3.3.1.8 Temperatura

A temperatura influencia diretamente a digestão anaeróbia, afetando tanto a atividade dos microrganismos quanto as propriedades físico-químicas do sistema. De acordo com a faixa ótima de crescimento microbiano, os processos anaeróbios podem ser classificados como psicrófilos, mesófilos e termófilos, com temperaturas características próximas de 15 °C, 37 °C e 60 °C, respectivamente (Kunz, 2022). Entre os grupos envolvidos, as arqueias metanogênicas acetoclásticas destacam-se pela maior sensibilidade às variações térmicas, tornando o controle da temperatura importante para a estabilidade do processo.

O aumento da temperatura pode favorecer a solubilização da matéria orgânica e acelerar as reações bioquímicas da digestão anaeróbia. Entretanto, temperaturas elevadas também podem aumentar a concentração de amônia livre (NH_3), composto tóxico para arqueias metanogênicas e capaz de comprometer o desempenho do sistema anaeróbio (Kunz, 2022). Além disso, variações bruscas de temperatura podem causar desequilíbrios microbiológicos e reduzir a produção de biogás, sendo importante manter condições térmicas estáveis durante a operação do biodigestor.

3.3.1.9 Sólidos totais e sólidos voláteis

A concentração de sólidos é um parâmetro importante na digestão anaeróbia, pois permite estimar a quantidade de matéria orgânica presente no substrato e seu potencial de conversão em biogás. Os sólidos totais (ST) representam a fração total de sólidos presentes no substrato, enquanto os sólidos totais voláteis (STV) correspondem à fração orgânica biodegradável pelos microrganismos anaeróbios. Dessa forma, a determinação desses parâmetros auxilia na caracterização do substrato e na avaliação do potencial biodegradável da biomassa (Lima, 2016).

O teor de sólidos também influencia as condições operacionais do processo anaeróbio, estando diretamente relacionado à quantidade de água presente no sistema. De acordo com a concentração de sólidos, os substratos podem apresentar características líquidas, pastosas ou sólidas, o que interfere no manejo, na transferência de massa e na eficiência da digestão anaeróbia (Lima, 2016).

3.4 Pré-tratamentos aplicados à biomassa lignocelulósica

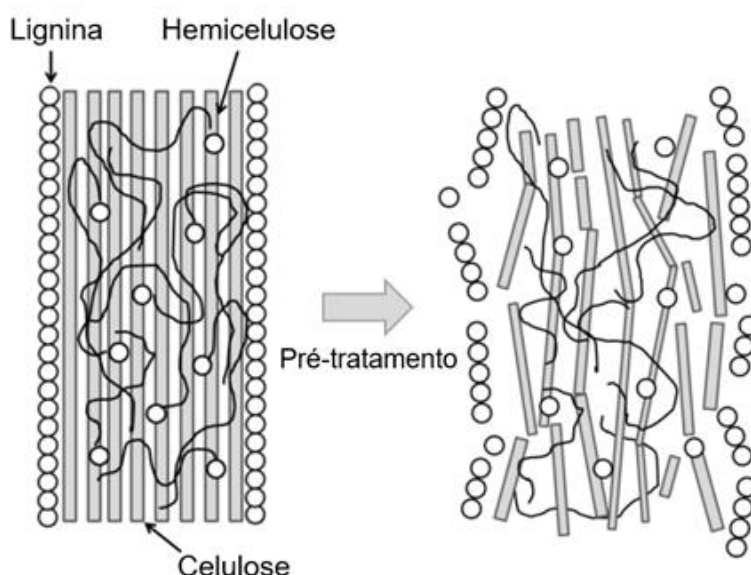
O pré-tratamento é uma etapa importante na produção de biogás, pois prepara a matéria orgânica para a digestão anaeróbia, tornando o substrato mais acessível à ação dos microrganismos, especialmente das arqueias metanogênicas. Essa etapa pode contribuir para a remoção de impurezas e para o aumento da eficiência da degradação da matéria orgânica, reduzindo o tempo necessário para produção de biogás e favorecendo a qualidade do gás gerado (Salihu; Alam, 2016).

A degradação da biomassa lignocelulósica é dificultada pela estrutura complexa formada por celulose, hemicelulose e lignina, como mostrado na Figura 3. Essas estruturas limitam o acesso dos microrganismos e de suas enzimas à matéria orgânica, tornando o material mais resistente à biodegradação. Além disso, a elevada cristalinidade e a baixa área superficial

da biomassa podem reduzir a eficiência da hidrólise, considerada uma das etapas limitantes da digestão anaeróbia (Montgomery; Bochmann, 2014).

Os métodos de pré-tratamento podem ser físicos, químicos ou biológicos, sendo utilizados tanto para remoção de impurezas quanto para modificação das características do substrato. Entre os principais efeitos desses tratamentos destaca-se o aumento da área superficial da biomassa, favorecendo a atividade microbiana e acelerando a degradação da matéria orgânica. Além disso, ajustes nas condições operacionais, como suplementação de nutrientes e correção do pH, também podem contribuir para condições mais favoráveis ao processo anaeróbio, elevando a eficiência da produção de biogás (Mirmohamadsadeghi, 2019).

Figura 3. Pré-tratamento de compostos lignocelulósicos



Fonte: Domingo (2022)

3.4.1 Pré-tratamento físico

Os pré-tratamentos físicos incluem técnicas como moagem, extrusão, tratamento por micro-ondas e ultrassom, sendo utilizados para reduzir o tamanho das partículas do substrato e aumentar a área superficial disponível para a ação microbiana durante a digestão anaeróbia (Gallego-Garcia *et al.*, 2023). Essas modificações favorecem o contato entre os microrganismos e a matéria orgânica, contribuindo para maior eficiência da degradação do substrato. Entretanto, apesar dos benefícios observados, esses métodos podem apresentar elevado consumo energético, o que representa uma das principais limitações de sua aplicação (Mankar *et al.*, 2021).

3.4.2 Pré-tratamento biológico

O pré-tratamento biológico consiste na utilização de microrganismos ou processos biológicos para favorecer a degradação da matéria orgânica antes da digestão anaeróbia. Entre as técnicas utilizadas destacam-se compostagem, digestão aeróbia e outros tratamentos biológicos capazes de promover a degradação parcial do substrato, tornando os compostos orgânicos mais acessíveis à ação microbiana durante a biodigestão (Zhang *et al.*, 2019). Além de facilitar a degradação da biomassa, esse tipo de pré-tratamento também pode contribuir para a redução de impurezas, carga patogênica e outros contaminantes presentes no substrato. A escolha da técnica mais adequada depende das características da biomassa utilizada e das condições operacionais do processo anaeróbio.

3.4.3 Pré-tratamento químico – solventes ácidos

No pré-tratamento ácido, agentes acidificantes são utilizados para promover a quebra das estruturas complexas da biomassa, aumentando a disponibilidade da matéria orgânica para a hidrólise e favorecendo a degradação anaeróbia (Chong *et al.*, 2021). Entre os ácidos mais utilizados destacam-se o ácido clorídrico (HCl), o ácido sulfúrico (H₂SO₄) e o ácido cítrico (C₆H₈O₆).

Apesar da eficiência observada, o uso de ácido sulfúrico exige controle rigoroso das condições operacionais, pois aplicações inadequadas podem favorecer a formação de hidroximetilfurfural (HMF), composto associado à geração de substâncias inibitórias capazes de comprometer a atividade microbiana e reduzir a eficiência da digestão anaeróbia (Chong *et al.*, 2021).

3.4.4 Pré-tratamento químico – solventes alcalinos

O pré-tratamento alcalino promove alterações estruturais na biomassa, aumentando a acessibilidade da matéria orgânica aos microrganismos envolvidos na digestão anaeróbia. Esse processo favorece a quebra de compostos complexos em estruturas mais simples e biodegradáveis, facilitando a degradação do substrato. Entre os reagentes alcalinos mais utilizados destacam-se o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH) (Linyi *et al.*, 2020).

Apesar dos benefícios observados, a concentração do agente alcalino deve ser cuidadosamente controlada, pois elevadas concentrações de íons sódio (Na⁺) e potássio (K⁺) podem exercer efeito inibitório sobre os microrganismos anaeróbios, comprometendo o

desempenho do sistema. Em geral, os estudos envolvendo hidróxido de sódio utilizam faixas de pH entre 8 e 12, com variações no tempo de exposição e na temperatura de operação (Elgarahy, 2023).

3.4.5 Comparação pré-tratamento ácido e alcalino

Olatunji *et al.* (2021) reuniram diversos estudos sobre pré-tratamentos químicos aplicados à biomassa lignocelulósica, demonstrando que essas técnicas promovem alterações estruturais capazes de influenciar diretamente a eficiência da digestão anaeróbia e a produção de biogás. Entre os métodos mais utilizados destacam-se os pré-tratamentos ácidos e alcalinos, que se diferenciam principalmente pelos componentes estruturais afetados durante o processo.

De acordo com a revisão, os pré-tratamentos ácidos utilizando compostos como ácido clorídrico (HCl), ácido sulfúrico (H₂SO₄) e ácido nítrico (HNO₃) favorecem a solubilização da hemicelulose e parte da lignina, aumentando a liberação de açúcares fermentescíveis e a eficiência hidrolítica da biomassa. Apesar disso, esses tratamentos podem gerar compostos inibitórios, como fenóis, furfural, aldeídos e 5-hidroximetilfurfural (HMF), capazes de comprometer etapas posteriores da digestão anaeróbia. Além disso, a elevada acidez do processo exige neutralização prévia do substrato e utilização de materiais resistentes à corrosão.

Entre os resultados apresentados na revisão, a casca de arroz submetida a tratamento com ácido propiônico e ácido acético apresentou aumento aproximado de 36% na produção de metano em relação à biomassa sem tratamento. Os autores também destacaram que a combinação de diferentes técnicas pode aumentar a eficiência do processo. Um exemplo foi o uso sequencial de amônia aquosa e ácido sulfúrico diluído em palha de arroz, que promoveu remoção de aproximadamente 69,8% da lignina durante a etapa alcalina e intensa solubilização da hemicelulose na etapa ácida subsequente, restando apenas 0,8 g desse componente para cada 100 g de biomassa seca tratada. Como consequência, os rendimentos de hidrólise enzimática variaram entre 90,8% e 96,9%, evidenciando a eficácia da combinação dos pré-tratamentos na redução da recalcitrância da biomassa lignocelulósica (Kim *et al.*, 2011).

De modo geral, a revisão realizada por Olatunji *et al.* (2021) indicou desempenho superior dos pré-tratamentos alcalinos em diferentes biomassas lignocelulósicas. O pré-tratamento alcalino aplicado à palha de trigo proporcionou aumento de aproximadamente 100% na produção de metano, enquanto o uso de hidróxido de sódio (NaOH) em palha de arroz resultou em incrementos variando entre 3% e 58%. Além disso, a combinação de NaOH com tratamento hidrotérmico promoveu aumento próximo de 112% na produção de metano, sugerindo que o uso combinado de técnicas pode potencializar a eficiência do processo.

Com base nos estudos analisados, os autores concluíram que os pré-tratamentos alcalinos apresentaram melhores resultados que os tratamentos ácidos em aplicações envolvendo digestão anaeróbia de biomassa lignocelulósica, principalmente devido à maior eficiência na remoção da lignina, considerada uma das principais barreiras à degradação biológica do material (Olatunji *et al.*, 2021).

3.5 Reatores anaeróbios

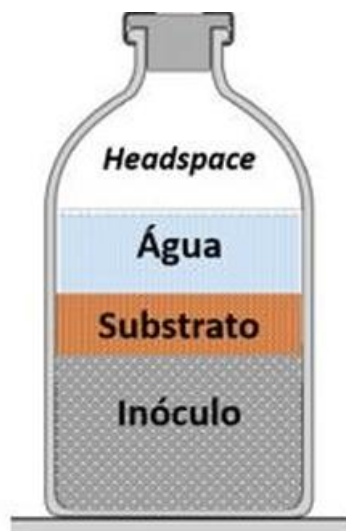
Os Reatores anaeróbios são sistemas utilizados para promover a degradação da matéria orgânica na ausência de oxigênio, por meio da ação de diferentes grupos de microrganismos. Segundo Chernicharo (1997), os reatores anaeróbios podem ser classificados de acordo com a forma de retenção da biomassa microbiana no sistema, sendo divididos em reatores de crescimento disperso e de crescimento aderido. Nos sistemas de crescimento disperso, a biomassa permanece suspensa no meio líquido, como ocorre em digestores convencionais, lagoas anaeróbias e reatores operados em batelada. Já nos sistemas de crescimento aderido, os microrganismos desenvolvem-se fixados em materiais suporte, como nos filtros anaeróbios. Existem ainda sistemas com elevada retenção de biomassa por sedimentação, como os reatores UASB.

3.5.1 Reator anaeróbio em batelada

O reator descontínuo, também conhecido como reator em batelada, opera com alimentação única no início do processo, permanecendo fechado durante o período reacional. Nesse sistema, os reagentes permanecem no interior do reator por determinado intervalo de tempo até a formação do produto final, que é removido apenas ao término da operação. Ao longo do processo, a composição do meio reacional varia continuamente, embora a mistura seja considerada homogênea em cada instante (Junior; Cruz, 2013).

Reatores em batelada são amplamente utilizados em estudos experimentais, especialmente em aplicações laboratoriais voltadas à avaliação de novos substratos, tecnologias e condições operacionais. Esse tipo de sistema apresenta vantagens como simplicidade operacional, facilidade de controle e baixo custo de implantação. Além disso, o maior tempo de permanência do substrato no reator pode favorecer elevadas conversões da matéria orgânica. Por outro lado, sua aplicação em larga escala é limitada devido ao maior custo operacional e à necessidade de operação descontínua (Fogler, 2018). A configuração básica de um reator anaeróbio em batelada pode ser observado na Figura 4.

Figura 4. Representação esquemática de um reator anaeróbio em batelada



Fonte: Adaptado de LIMA (2016)

3.6 Produção de metano

A produção de metano ocorre na etapa final da digestão anaeróbia, denominada metanogênese, na qual arqueias metanogênicas utilizam compostos intermediários formados nas etapas anteriores para geração de metano. As arqueias metanogênicas podem ser divididas principalmente em acetoclásticas e hidrogenotróficas. As acetoclásticas convertem ácido acético em metano e dióxido de carbono, enquanto as hidrogenotróficas utilizam hidrogênio e dióxido de carbono como substratos para formação de metano (Kunz *et al.*, 2022).

As arqueias acetoclásticas desempenham papel importante na produção de metano em sistemas anaeróbios, enquanto as hidrogenotróficas auxiliam no consumo de hidrogênio e na manutenção do equilíbrio do processo anaeróbio (Figueiredo, 2012).

O potencial de produção de metano está diretamente relacionado à composição química e à biodegradabilidade do substrato utilizado. Substratos ricos em lipídios geralmente apresentam maior potencial metanogênico devido ao elevado teor energético associado à sua estrutura molecular. Entretanto, concentrações excessivas de lipídios podem causar instabilidade no sistema anaeróbio, enquanto substratos proteicos podem favorecer a formação de compostos nitrogenados potencialmente inibitórios ao processo (Angelidaki; Sanders, 2004).

Dessa forma, compreender os mecanismos envolvidos na metanogênese é importante para avaliar o potencial de conversão da matéria orgânica em metano nos sistemas anaeróbios.

3.6.1 Estimativa da produção de metano

Diferentes métodos podem ser utilizados para estimar a produção de metano durante a digestão anaeróbia, incluindo ensaios experimentais, modelos cinéticos e estimativas baseadas na remoção da matéria orgânica (Sousa *et al.*, 2024).

Neste trabalho, a estimativa da produção de metano foi realizada a partir da Demanda Química de Oxigênio (DQO) removida no sistema. Esse método baseia-se na relação estequiométrica da oxidação do metano, apresentada na Equação 1 (Buswell, 1930 *apud* Lima, 2016).



Teoricamente, cada 1 g de DQO removida corresponde à produção aproximada de 350 mL de CH₄ em Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), ou cerca de 396 mL de CH₄ a 35 °C e 1 atm. (Lima, 2016; Chernicharo, 2007). Dessa forma, a DQO removida pode ser utilizada para estimar teoricamente o potencial de geração de metano no processo anaeróbio.

4. METODOLOGIA

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Controle Ambiental (LCA), situado no Centro de Tecnologia (CTEC) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) através de 9 (nove) reatores anaeróbios operados em batelada, de volume total igual a 120 mL, sendo dividido em volume reacional 60 mL e *headspace* 60 mL, mantidos sob uma temperatura de $35\pm 1^{\circ}\text{C}$ e rotação de 120 rpm (Figura 5).

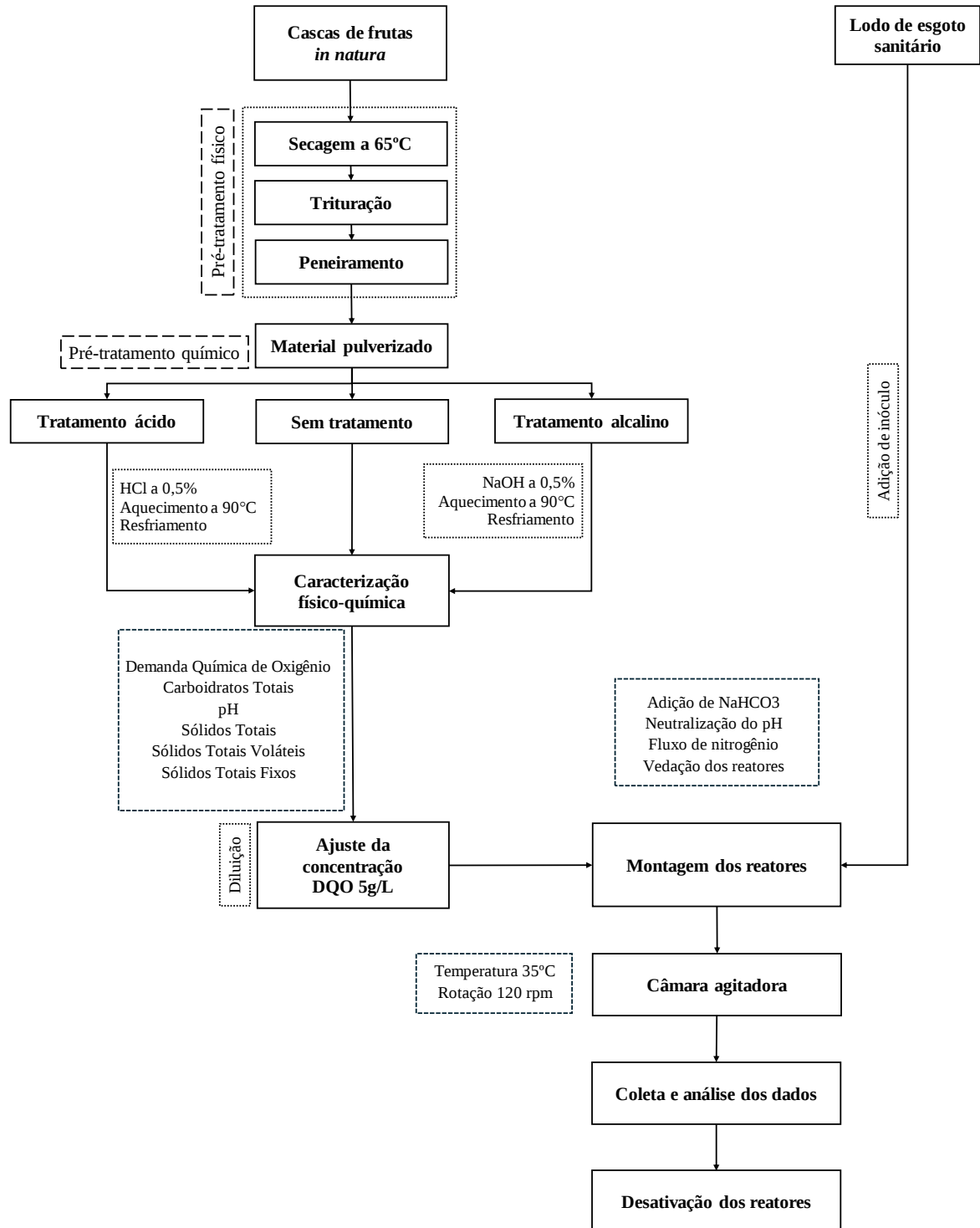
Figura 5. Reator anaeróbio de volume total igual a 120 mL



Fonte: Autor (2026)

O fluxograma disposto na Figura 6 apresenta as principais etapas e procedimentos da metodologia adotada.

Figura 6. Fluxograma do estudo



Fonte: Autor (2026)

4.1 Substratos

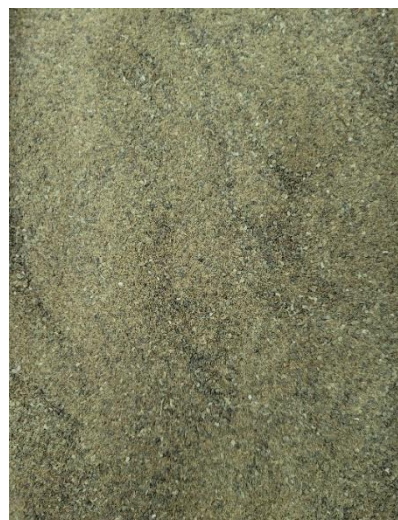
Os resíduos utilizados, cascas de frutas (manga e maracujá) foram coletadas no município de Anadia, Alagoas. Em seguida, o material foi encaminhado ao Laboratório de Biocombustíveis (LABIO) do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas (CECA/UFAL), onde foi submetido à secagem em estufa a 65 °C por 48 h, conforme Marçal et al. (2026).

Após a secagem em estufa, as cascas foram trituradas em liquidificador industrial e, posteriormente, peneiradas até obtenção de partículas com granulometria aproximada de 5 µm, que posteriormente foram submetidas aos pré-tratamentos químicos (Figuras 7 e 8).

Figura 8. Casca de maracujá triturada após secagem



Figura 7. Casca de manga triturada após secagem



Fonte: Autor (2026)

4.2 Pré-tratamento químico

No pré-tratamento, adotou-se a proporção de 1,0 g de casca de fruta triturada para 20 mL de solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) ou ácido clorídrico (HCl), ambos na concentração de 0,5%, seguindo o protocolo de Freire Neto (2019). Posteriormente, a mistura foi submetida ao aquecimento por 30 min, em frascos de borossilicato, à temperatura de 90 ± 2 °C. Após essa etapa, o material foi neutralizado até pH 7,0 mediante a adição de solução aquosa diluída de NaOH ou HCl, em concentrações adequadas (Figura 9).

Figura 9. Misturas de substratos após tratamento químico



Fonte: Autor (2026)

As soluções utilizadas nos pré-tratamentos foram preparadas previamente por diluição, adotando-se a Equação 2:

$$C_i V_i = C_f V_f \quad (2)$$

Onde:

C_i = Concentração inicial;

V_i = Volume inicial;

C_f = Concentração final;

V_f = Volume final.

Para o preparo da solução de HCl a 0,5%, partiu-se de ácido clorídrico concentrado, aproximadamente 37%, sendo utilizados 13,51 mL do reagente concentrado e completado o volume final para 1 L com água destilada. A solução de NaOH a 0,5% foi preparada a partir de uma solução estoque a 5%, utilizando-se 100 mL da solução inicial e completando-se o volume com 900 mL de água destilada, totalizando 1 L de solução final.

Após a adição das soluções aos substratos, as misturas foram submetidas ao aquecimento em frascos de borossilicato, sob temperatura controlada a 90°C por 30 minutos. Posteriormente, o material foi resfriado à temperatura ambiente com o objetivo de evitar interferências térmicas nas etapas subsequentes. Em seguida, realizou-se a filtração a vácuo, utilizando sistema de filtração acoplado, visando a separação da fração sólida e líquida e a obtenção de um filtrado mais homogêneo e livre de partículas em suspensão.

4.3 Inóculo

O reator foi inoculado com lodo anaeróbio proveniente de um reator UASB, que foi coletado em uma estação de tratamento de esgoto sanitário (ETE) de um condomínio residencial, localizado no bairro Tabuleiro do Martins, em Maceió, Alagoas, Brasil. O lodo foi previamente armazenado sob refrigeração, em temperatura controlada entre 1 e 5 °C, visando preservar suas características microbiológicas até o momento da inoculação.

4.4 Caracterização dos substratos e inóculo

As análises de caracterização físico-química das cascas de manga e maracujá devidamente processadas e após o pré-tratamento térmico ácido e alcalino e do inóculo foram realizadas considerando os seguintes parâmetros e metodologias, pH, pelo método eletrométrico (APHA, 2017); demanda química de oxigênio (DQO), determinada por meio do método colorimétrico (APHA, 2017); carboidratos totais, pelo método colorimétrico (Dubois et al., 1956); e sólidos totais (fixos e voláteis), pelo método gravimétrico (APHA, 2017).

4.5 Montagem dos reatores

Montou-se um conjunto experimental contendo 9 (nove) reatores anaeróbios em batelada, de acordo com a Tabela 1, para realização dos ensaios. As cascas de manga e maracujá trituradas e tratadas foram diluídas nas proporções necessárias para que todos os reatores fossem alimentados com uma concentração inicial de aproximadamente 5 g DQO.L-1 (antes de adicionar o inóculo), considerando os valores iniciais de DQO obtidos na caracterização dos substratos, considerando o volume total de substrato de 90% do volume útil e os 10% restantes correspondem o volume do inóculo (Gois, 2023).

Tabela 1. Composição dos reatores

R	S	PT	Substrato diluído (mL)	Inóculo (mL)	Concentração de NaOH (% m/v)	Concentração de HCl (% m/v)
R1	Maracujá	Ácido	54	6	-	0,5
R2	Maracujá	Ácido	54	6	-	0,5
R3	Maracujá	Alcalino	54	6	0,5	-
R4	Maracujá	Alcalino	54	6	0,5	-

R	S	PT	Substrato diluído (mL)	Inóculo (mL)	Concentração de NaOH (% m/v)	Concentração de HCl (% m/v)
R5	Manga	Ácido	54	6	-	0,5
R6	Manga	Ácido	54	6	-	0,5
R7	Manga	Alcalino	54	6	0,5	-
R8	Manga	Alcalino	54	6	0,5	-
Branco	-	-	0	30	-	-

Legenda: R – Reatores; S – Substratos; PT – Pré-tratamento ácido ou alcalino.

Fonte: Autor (2026)

Para cada condição experimental, foram montados dois reatores em duplicata, totalizando dois reatores para cada tipo de fruta e para cada tipo de pré-tratamento. Adicionalmente, foi incluído um reator branco, contendo apenas o inóculo.

O sistema experimental foi operado sob condições mesofílicas, visando a avaliação da produção de metano a partir da digestão anaeróbia de resíduos de frutas submetidos a diferentes condições de pré-tratamento. Para garantir a estabilidade do pH durante o processo anaeróbio, foi adicionado bicarbonato de sódio (NaHCO_3) ao meio reacional, atuando como agente tamponante.

A utilização desse composto visa manter o pH próximo da neutralidade, condição necessária para a adequada produção de metano, além de contribuir para a estabilidade operacional do sistema, conforme relatado na literatura (Zhang et al., 2018; Doll; Foresti, 2010; Rocha; Silva, 2020).

Após a homogeneização dos substratos com o bicarbonato, o pH do material foi ajustado para aproximadamente 7,0 por meio da adição controlada de soluções diluídas de hidróxido de sódio (NaOH) e ácido clorídrico (HCl). Posteriormente, os reatores foram hermeticamente vedados com lacres que tinham válvulas acoplados para a coleta do gás gerado (Figura 10).

Após o fechamento, os reatores foram acondicionados em câmara agitadora, operando sob condições mesofílicas, com temperatura controlada em torno de 35 °C e agitação aproximada de 120 rpm (Figura 11). Foram mantidos em condições adequadas para a digestão anaeróbia por um período determinado de 24h, possibilitando a atividade de produção dos microrganismos para início das leituras. Os ensaios foram conduzidos por um período de operação de 60 dias, sendo os reatores monitorados periodicamente.

Figura 10. Reatores operados em batelada



Fonte: Autor (2026)

Figura 11. Reatores incubados em câmara agitadora



Fonte: Autor (2026)

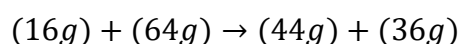
4.6 Análises físico-químicas

Durante a montagem dos reatores, foram coletadas amostras para análise inicial dos parâmetros físico-químicos. Ao fim dos ensaios, também foram coletadas amostras dos reatores em sua fase final para realização das mesmas análises. Essas análises foram utilizadas para verificar a eficiência do processo de digestão anaeróbia e comparar a eficiência na remoção simultânea de matéria orgânica e conversão de carboidratos em cada condição à qual os substratos foram submetidos. As análises físico-químicas realizadas foram, pH, pelo método

eletrométrico (APHA, 2017), demanda química de oxigênio (DQO), determinada por meio do método colorimétrico (APHA, 2017), e carboidratos totais, pelo método colorimétrico (Dubois et al., 1956).

4.7 Estimativa da produção de metano

A estimativa da produção de metano foi realizada a partir da DQO removida, de acordo com Chernicharo (2007), esse método baseia-se na relação estequiométrica da oxidação do metano (Equação 1), previamente apresentada no item 3.6.1.



A partir dessa equação, deduz-se que um mol de metano necessita de dois moles de oxigênio para completar sua oxidação, transformando-se em gás carbônico e água. Logo, para cada 16 g de metano produzido, são consumidos 64 g de DQO.

Para estimativa da produção de metano no reator, utiliza-se a Equação 3, que permite analisar a conversão da massa de metano produzida para produção volumétrica.

$$V_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{f(T)} \quad (3)$$

Onde:

V_{CH_4} = Produção volumétrica de metano

DQO_{CH_4} = Carga de DQO removida no reator e convertida em metano

$f(T)$ = Fator de correção para a temperatura operacional do reator

O fator de correção foi calculado a partir da Equação 4.

$$f(T) = \frac{P * K_{DQO}}{R * (273 + T)} \quad (4)$$

Onde:

P = Pressão atmosférica (atm.)

K_{DQO} = DQO correspondente a um mol de CH_4 (64 g DQO/mol)

R = Constante dos gases (0,08206 atm.L/mol.K)

T = Temperatura operacional do reator

Considerando condições normais de temperatura e pressão, levaria a um volume de 350 mL de CH₄ para cada grama de DQO removida. Com isso para o cálculo da carga de DQO convertida em metano, subtraiu-se da carga de DQO a parcela utilizada nas fases acidogênica e metanogênica. Conforme a metodologia de Chernicharo (2007), a carga calculada de DQO foi multiplicada pelos fatores 0,15 (fase acidogênica) e 0,03 (fase metanogênica), em seguida, o valor obtido foi subtraído do valor total da carga de DQO calculada, resultando assim no valor de DQO convertido em metano.

O volume de metano produzido foi estimado a partir da DQO convertida em metano utilizando o fator de correção para a temperatura do sistema (35 °C) como proposto por Chernicharo (2007), o fator de correção foi calculado conforme a Equação 4 e o volume do metano obtido pela Equação 3.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização físico-química dos substratos e inóculo

A Tabela 2 apresenta a caracterização físico-química dos substratos e inóculo conforme os parâmetros citados, para cada uma das condições experimentais descritas previamente na Tabela 1 utilizadas nas montagens dos reatores.

Tabela 2. Caracterização físico-química dos substratos e inóculo

Parâmetros	Maracujá			Manga			Inóculo
	S/PT	PT Ácido	PT Alcalino	S/PT	PT Ácido	PT Alcalino	
DQO total (g/L)	14	18	17,4	33	29,2	26,6	-
Carboidratos totais (g/L)	17,02	14,73	4,33	1,79	20,25	4,25	-
pH	3,4	1,45	11,72	3,5	1,84	11,92	6,38
Sólidos totais (g/L)	5,7	5,98	16,18	23,37	23,82	43,1	30
Sólidos totais voláteis (g/L)	5,02	5,27	4,4	19,14	22,26	14,77	6
Sólidos totais fixos (g/L)	0,68	0,7	11,78	4,23	1,56	28,33	24

Legenda: S/PT – Sem pré-tratamento ácido ou alcalino; PT – Pré-tratamento ácido ou alcalino.

Fonte: Autor (2026)

O inóculo apresentou pH de 6,38, valor próximo da neutralidade e adequado ao desenvolvimento dos microrganismos envolvidos na digestão anaeróbia. Os sólidos totais voláteis (6 g/L) indicam presença de biomassa microbiana ativa, importante para o início do processo e degradação da matéria orgânica presente nos substratos. Já o elevado teor de sólidos fixos (24 g/L) sugere maior presença de fração inorgânica e resíduos minerais, característica comum em lodos utilizados como inóculo anaeróbio.

Resultado semelhante foi observado por Santos (2019), que ao utilizar lodo anaeróbio industrial e lodo de esgoto em reatores em batelada encontrou valores de pH entre 6,67 e 7,72, além de atividade metanogênica entre 0,15 e 0,17 gDQOCH₄.g⁻¹SV.dia, demonstrando condições adequadas ao desenvolvimento microbiológico e à estabilidade do processo anaeróbio.

As diferenças entre os substratos que foram observados aos pré-tratamentos aplicados, levando em consideração as propriedades físico-químicas descritas na Tabela 2, indicam mudanças na disponibilidade da matéria orgânica e nas propriedades estruturais das biomassas

de lignocelulose. Em geral, a casca de manga apresentou maior concentração de DQO total, sólidos totais e sólidos voláteis do que a casca de maracujá, indicando maior quantidade de matéria orgânica potencialmente disponível para conversão biológica. A manga sem pré-tratamento apresentou DQO de 33 g/L e STV de 19,14 g/L, enquanto o maracujá sem pré-tratamento apresentou DQO de 14 g/L e STV de 5,02 g/L. Esses resultados indicam maior disponibilidade de matéria orgânica biodegradável na biomassa da manga.

Esse comportamento pode estar relacionado à composição lignocelulósica de cada biomassa. Embora a manga apresente maior concentração de matéria orgânica, seu maior teor de lignina ($\approx 10\%$) pode limitar a acessibilidade dos microrganismos aos compostos biodegradáveis. Em contrapartida, o maracujá apresenta menor teor de lignina ($\approx 4,9\%$) e maior teor de celulose ($\approx 25,4\%$), características que favorecem sua degradação biológica (Ismail et al., 2025).

Os valores de pH observados após os pré-tratamentos confirmam a ação dos reagentes químicos empregados sobre os substratos. Os materiais submetidos ao pré-tratamento ácido apresentaram pH entre 1,45 e 1,84, enquanto os submetidos ao pré-tratamento alcalino apresentaram pH entre 11,72 e 11,92. Esses valores evidenciam a intensidade das alterações químicas promovidas pelos tratamentos e justificam a etapa posterior de neutralização realizada antes da montagem dos reatores. Esse procedimento foi necessário porque as arqueias metanogênicas apresentam melhor desempenho em condições próximas à neutralidade, sendo sensíveis a valores extremos de pH (Chernicharo, 2007).

O pré-tratamento ácido promoveu comportamentos distintos entre os substratos. No maracujá, a DQO aumentou de 14 para 18 g/L, indicando maior solubilização da matéria orgânica após hidrólise parcial da hemicelulose. Na manga, a DQO diminuiu de 33 para 29,2 g/L após o pré-tratamento ácido. Apesar dessa redução na DQO total, observou-se aumento expressivo dos carboidratos totais na manga, passando de 1,79 para 20,25 g/L. Esse resultado sugere que o pré-tratamento ácido promoveu a hidrólise parcial da hemicelulose e de frações mais acessíveis da celulose presentes na biomassa, aumentando a concentração de açúcares solúveis no meio.

Com o pré-tratamento alcalino, observou-se DQO de 17,4 g/L para o maracujá e 26,6 g/L para a manga. O tratamento com NaOH atua principalmente na remoção parcial da lignina e na desestruturação da matriz lignocelulósica, aumentando a exposição da celulose. No caso do maracujá, o elevado teor de celulose e o baixo teor de lignina potencializaram o efeito do pré-tratamento alcalino, aumentando a acessibilidade da biomassa. No entanto, para a manga, o elevado teor de sólidos fixos após o tratamento alcalino (28,33 g/L) sugere aumento da fração

não biodegradável e presença residual de compostos inorgânicos provenientes do NaOH, o que pode ter influenciado negativamente as características do substrato.

A caracterização observada está de acordo com a literatura. Resultados semelhantes também foram observados por Domingos (2022), ao analisar silagem de capim-elefante submetida a pré-tratamento alcalino em reatores anaeróbios em batelada. A autora encontrou valores de DQO variando entre 11,84 e 23,63 g/L, carboidratos entre 8,66 e 12,93 g/L e sólidos totais entre 15,58 e 57,38 g/L, demonstrando que o pré-tratamento químico influencia diretamente a composição físico-química e a disponibilidade da matéria orgânica em biomassas lignocelulósicas.

5.2 Eficiência de remoção de DQO e carboidratos

A Tabela 3 apresenta as análises físico-químicas iniciais e finais das misturas dos reatores, bem como as eficiências de remoção acerca dos parâmetros DQO e carboidratos.

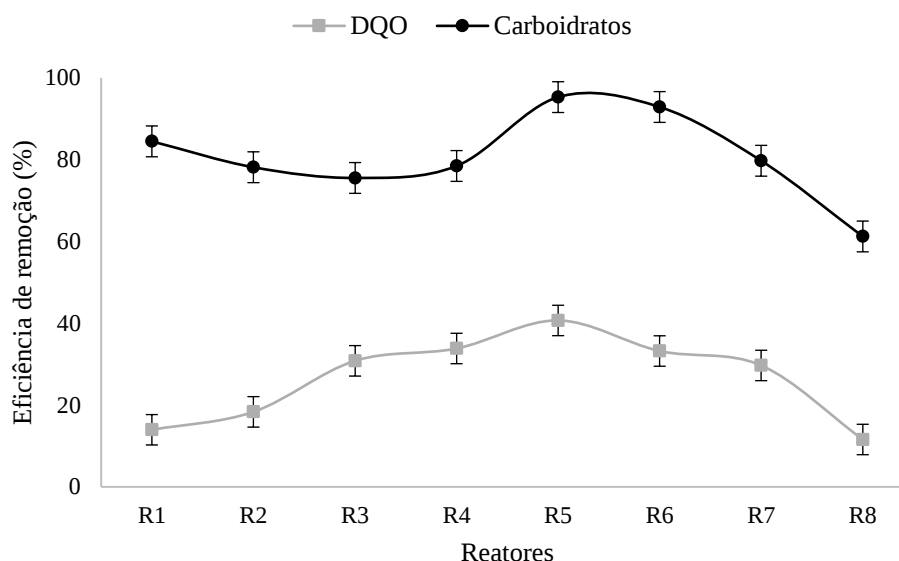
Tabela 3. Características iniciais e finais e eficiências de remoção nos reatores

Parâmetros	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
DQO _{inicial} (g/L)	12,44	9,46	13,68	13,92	12,19	11,20	11,69	10,70
DQO _{final} (g/L)	10,70	7,73	9,46	9,21	7,23	7,48	8,22	9,46
Eficiência de remoção DQO (%)	13,96	18,34	30,82	33,83	40,68	33,22	29,69	11,58
Carboidratos _{inicial} (g/L)	4,10	2,03	1,64	1,55	6,48	4,68	1,71	0,79
Carboidratos _{final} (g/L)	0,64	0,44	0,40	0,33	0,31	0,33	0,35	0,31
Eficiência de remoção Carboidratos (%)	84,46	78,14	75,52	78,45	95,29	92,87	79,73	61,22
pH _{inicial}	2,04	2,06	11,91	11,90	2,27	2,34	11,70	11,70
pH _{corrigido}	6,99	7,04	6,95	7,09	6,96	7,07	6,98	7,00
pH _{final}	7,28	7,15	7,11	7,22	6,98	7,01	7,76	7,29

Legenda: R1 – maracujá ácido; R2 – maracujá ácido; R3 – maracujá alcalino; R4 – maracujá alcalino; R5 – manga ácido; R6 – manga ácido; R7 – manga alcalino; R8 – manga alcalino

Fonte: Autor (2026)

A Figura 12 apresenta o comportamento das eficiências de remoção de DQO e carboidratos nos diferentes reatores anaeróbios avaliados.

Figura 12. Eficiências de remoção de DQO e carboidratos nos reatores

Fonte: Autor (2026)

De maneira geral, observou-se influência direta do tipo de substrato e do pré-tratamento aplicado sobre a remoção de DQO e carboidratos. A maior parte dos reatores apresentou redução de carboidratos superior a 75%, indicando consumo significativo da matéria orgânica solúvel pelos microrganismos anaeróbios ao longo da digestão. Comportamento semelhante foi observado por Ribeiro (2022), que avaliou resíduos do processamento de goiaba em reatores anaeróbios em batelada e verificou elevados consumos de carboidratos, variando entre 94,08% e 99,09%, associados a remoções de DQO entre 68,19% e 92,76% após pré-tratamentos térmicos com adição de H_2SO_4 e HCl . Embora as eficiências de remoção de DQO observadas neste estudo tenham sido inferiores às reportadas pelo autor, ambos os trabalhos evidenciam que a redução dos carboidratos está relacionada ao consumo das frações orgânicas mais facilmente biodegradáveis durante a digestão anaeróbia, contribuindo para a conversão da matéria orgânica em biogás e metano.

Os valores de pH observados ao longo da digestão permaneceram dentro da faixa considerada adequada para a atividade metanogênica. A utilização de bicarbonato de sódio como agente tamponante também ajudou a reduzir as flutuações bruscas de pH durante a digestão anaeróbia, contribuindo para a estabilidade do meio reacional e influenciando positivamente a atividade das arqueias metanogênicas.

Os maiores valores de remoção de DQO foram observados nos reatores R5 e R6, contendo casca de manga submetida ao pré-tratamento ácido, com eficiências de 40,68% e

33,22%, respectivamente. Esses reatores também apresentaram os maiores percentuais de remoção de carboidratos, alcançando 95,29% e 92,87%. Os resultados sugerem que o tratamento ácido favoreceu a disponibilização de matéria orgânica mais facilmente assimilável pelos microrganismos anaeróbios.

Nos reatores R3 e R4, contendo maracujá submetido ao pré-tratamento alcalino, também foram observadas remoções satisfatórias de DQO, iguais a 30,82% e 33,83%, associadas a remoções de carboidratos de 75,52% e 78,45%, respectivamente. Esses resultados demonstram melhor resposta do maracujá ao tratamento alcalino nas condições avaliadas, sugerindo maior aproveitamento da fração orgânica presente no substrato.

Em contrapartida, os reatores R1 e R2, contendo maracujá submetido ao pré-tratamento ácido, apresentaram as menores remoções de DQO dentre os reatores contendo esse substrato, com eficiências de 13,96% e 18,34%, respectivamente. Apesar das remoções de carboidratos permanecerem superiores a 78%, os menores valores de remoção de DQO sugerem menor aproveitamento da matéria orgânica disponível. Os resultados indicam que parte da matéria orgânica solubilizada pelo tratamento ácido pode não ter sido facilmente assimilada durante a digestão anaeróbia.

Resultado semelhante foi observado por Santos (2019), que ao avaliar resíduos agroindustriais de frutas em reatores anaeróbios em batelada verificou que hidrolisados de maracujá apresentaram baixos potenciais de geração de biogás e metano quando comparados a outras condições avaliadas. A autora também observou remoções de DQO entre 81% e 89%, relacionando maiores remoções da matéria orgânica à maior conversão em biogás e metano.

O reator R7 apresentou desempenho intermediário, com remoção de DQO de 29,69% e remoção de carboidratos de 79,73%, indicando maior eficiência em relação ao R8 para a biomassa de manga submetida ao pré-tratamento alcalino.

O comportamento menos favorável foi observado no reator R8, que apresentou a menor remoção de carboidratos (61,22%) e a menor eficiência de remoção de DQO (11,58%). Isso pode estar associado à baixa concentração inicial de carboidratos biodegradáveis no meio reacional, uma vez que o reator apresentou o menor valor inicial dentre todas as condições avaliadas, igual a 0,79 g/L. Mesmo com a redução da concentração para 0,31 g/L, a limitada disponibilidade inicial de substrato provavelmente restringiu a atividade microbiana e reduziu o aproveitamento da matéria orgânica.

Além disso, o pré-tratamento alcalino aplicado à casca de manga no R8 pode não ter promovido liberação suficiente de açúcares fermentáveis nas condições avaliadas. Associado a isso, o elevado teor de sólidos fixos observado anteriormente para a manga submetida ao

tratamento alcalino sugere maior presença de fração inorgânica residual no meio, o que pode ter reduzido proporcionalmente a disponibilidade da fração orgânica biodegradável.

Os resultados obtidos estão de acordo com a literatura. Domingos (2022), ao avaliar silagem de capim-elefante submetida a pré-tratamento alcalino em reatores anaeróbios em batelada, observou remoções de DQO variando entre 35% e 85%, relacionando os melhores resultados à maior disponibilidade de matéria orgânica após o pré-tratamento químico da biomassa lignocelulósica.

As diferenças observadas entre os substratos indicam que a resposta ao pré-tratamento depende não apenas do reagente utilizado, mas também das características estruturais da biomassa. Os resultados obtidos neste estudo corroboram observações relatadas na literatura para biomassas lignocelulósicas submetidas a pré-tratamentos químicos. Freire Neto (2019), ao comparar tratamentos ácido (HCl) e alcalino (NaOH) aplicados à casca de mandioca em reatores anaeróbios em batelada, verificou aumento da produção de metano em ambas as condições, com desempenho superior para o tratamento alcalino.

De forma semelhante, Olatunji et al. (2021), ao reunirem resultados de diferentes biomassas lignocelulósicas, observaram que os pré-tratamentos alcalinos tendem a promover maiores incrementos na produção de metano devido à maior remoção da lignina e ao aumento da acessibilidade da celulose e hemicelulose aos microrganismos anaeróbios. Entretanto, a resposta ao pré-tratamento depende das características estruturais de cada biomassa.

No presente estudo, o maracujá apresentou melhor desempenho após o tratamento alcalino, enquanto a manga respondeu de forma mais favorável ao tratamento ácido, evidenciando que a eficiência do pré-tratamento está diretamente relacionada à composição lignocelulósica e à disponibilidade de matéria orgânica biodegradável de cada substrato.

5.3 Estimativa da produção de metano

Com base na remoção de DQO observada nos reatores em batelada para cada condição submetida, nos 60 dias de operação, foi estimada a produção de metano conforme os procedimentos descritos na metodologia. A Tabela 4 expõe os parâmetros obtidos.

Tabela 4. Valores de DQO convertida em metano

R	S	PT	Carga de DQO removida (mg DQO.dia ⁻¹)	Carga de DQO convertida em CH ₄ (mg DQO CH ₄ .dia ⁻¹)	V total de CH ₄ produzido (mL)	Produção de CH ₄ (mL.dia ⁻¹)
R1	Maracujá	Ácido	1,74	1,42	33,72	0,56
R2	Maracujá	Ácido	1,74	1,42	33,72	0,56
R3	Maracujá	Alcalino	4,21	3,46	81,90	1,36
R4	Maracujá	Alcalino	4,71	3,86	91,53	1,53
R5	Manga	Ácido	4,96	4,07	96,35	1,61
R6	Manga	Ácido	3,72	3,05	72,26	1,20
R7	Manga	Alcalino	3,47	2,85	67,44	1,12
R8	Manga	Alcalino	1,24	1,02	24,09	0,40

Legenda: R – Reatores; S – Substratos; PT – Pré-tratamento ácido ou alcalino; V – Volume; CH₄ – Metano.

Fonte: Autor (2026)

De modo geral, os resultados obtidos indicam possível eficiência da produção de metano esteve diretamente relacionada à disponibilidade de matéria orgânica biodegradável liberada pelos pré-tratamentos que foram aplicados.

No caso do maracujá, os reatores submetidos ao tratamento alcalino (R3 e R4) apresentaram desempenho superior aos submetidos ao tratamento ácido (R1 e R2), alcançando produções estimadas de 81,90 e 91,53 mL de CH₄, respectivamente, enquanto os reatores ácidos produziram apenas 33,72 mL ambos. Esse comportamento sugere que o pré-tratamento alcalino promoveu maior desestruturação da biomassa lignocelulósica e melhor acessibilidade a fração de celulose aos microrganismos anaeróbios.

Resultado semelhante foi encontrado por Domingos (2022), a qual constatou um rendimento superior para biomassas lignocelulósicas submetidas ao pré-tratamento alcalino na concentração entre 2,25% e 4% de NaOH, explicando tal comportamento pela maior disponibilidade de matéria orgânica biodegradável após a desestruturação da biomassa.

Além disso, Santos (2019) em uma avaliação com resíduos agroindustriais de frutas em reatores anaeróbios de batelada, encontrou que os hidrolisados de maracujá possuem os mais baixos potenciais de geração de biogás e metano entre aquelas que foram testadas em seu estudo. Esse comportamento apresenta afinidade com o comportamento dos reatores R1 e R2

do presente trabalho, que receberam o pré-tratamento ácido, sugerindo que a hidrólise ácida do maracujá pode não ser a desejável para a etapa metanogênica sob certas condições operacionais.

No entanto, o estudo também relatou remoções de DQO entre 81% e 89% em sistemas que utilizam resíduos de maracujá, associando maior remoção de matéria orgânica a maior conversão em biogás e metano. Portanto, os resultados deste estudo indicam que o potencial metanogênico do maracujá foi fortemente afetado pelo tipo de tratamento aplicado, o tratamento alcalino apresentou desempenho muito superior ao tratamento ácido.

Costa (2013) destaca que a biomassa lignocelulósica submetida a pré-tratamentos ácidos pode sofrer degradação de açúcares e geração de compostos inibitórios secundários, como furfurool e hidroximetilfurfural (HMF), derivados da decomposição de monossacarídeos em meio ácido. Tais compostos podem atuar como inibidores microbiológicos, diminuindo a eficiência biológica da digestão anaeróbia e prejudicando a conversão da matéria orgânica em metano, hipótese que pode estar relacionada ao baixo desempenho dos reatores R1 e R2.

No entanto, a manga exibiu um comportamento diferente do maracujá. Os maiores valores para a produção acumulada estimada de metano foram observados nos reatores ácidos, R5 e R6, com 96,35 e 72,26 mL de CH₄ respectivamente. Esse resultado pode ser atribuído a uma maior concentração de lignina na casca da manga (~10%), uma propriedade que aumenta a recalcitrância da biomassa estrutural. Embora mais eficiente na solubilização da hemicelulose e na liberação de açúcares fermentáveis resultantes de ácidos orgânicos, neste caso, o tratamento ácido revelou-se muito forte para a hemicelulose e para a digestão anaeróbia.

Resultado semelhante foi observado por Freire Neto (2019) que aplicou pré-tratamento químico em casca de mandioca, constatando aumento na disponibilidade de carboidratos e melhoria na produção de biogás após pré-tratamento ácido. O autor relatou que o pré-tratamento com HCl a 1,0% resultou em 57,19 mL de CH₄, um valor superior em 26,19% em relação ao reator sem pré-tratamento. O autor também ressaltou que concentrações altas de NaOH e HCl podem levar a diminuição da eficiência biológica do método anaeróbio, o que mostra a importância da utilização da concentração correta na aplicação do pré-tratamento.

Assim, constata-se que os resultados obtidos indicam que a resposta ao pré-tratamento é diretamente influenciada pela estrutura lignocelulósica de cada biomassa. O maracujá tem um desempenho melhor em condição alcalina, e a manga tem uma resposta mais favorável ao pré-tratamento ácido, mostrando a importância da composição lignocelulósica na acessibilidade da matéria orgânica e no potencial metanogênico.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu estimar o potencial de produção de metano a partir de cascas de manga e maracujá submetidas a pré-tratamentos ácido e alcalino em reatores anaeróbios em batelada. Os resultados demonstraram influência direta do tipo de biomassa e do pré-tratamento aplicado sobre o desempenho da digestão anaeróbia, avaliado pela remoção de DQO e de carboidrato no sistema.

Os maiores valores de remoção de DQO e carboidratos, assim como as maiores estimativas de produção de metano, foram observados nos reatores contendo casca de manga submetida ao pré-tratamento ácido. Para o maracujá, os melhores resultados foram obtidos nos reatores submetidos ao pré-tratamento alcalino, indicando maior aproveitamento da matéria orgânica nessas condições.

Embora as condições avaliadas tenham apresentado baixos valores estimados de produção de metano, os resultados demonstraram potencial de aproveitamento energético das cascas de manga e maracujá para aplicação em processos de digestão anaeróbia e geração de energia renovável.

Para trabalhos futuros, recomenda-se:

- A realização de análises por cromatografia gasosa para determinação da produção acumulada de CH_4 ;
- A análise de metabólitos solúveis para identificação das vias metabólicas predominantes durante a digestão anaeróbia;
- A realização de ensaios de codigestão anaeróbia visando suprir limitações nutricionais e melhorar a disponibilidade de matéria orgânica biodegradável nos substratos avaliados.

REFERÊNCIAS

- ABOLORE, R. S.; JAISWAL, S.; JAISWAL, A. K. Green and sustainable pretreatment methods for cellulose extraction from lignocellulosic biomass and its applications: a review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, v. 7, p. 100396, 2024.
- ABUDI, Z. N.; HU, Z.; ABOOD, A. R.; LIU, D.; GAO, A. Effects of alkali pre-treatment, total solid content, substrate to inoculum ratio, and pH on biogas production from anaerobic digestion of mango leaves. *BioEnergy Research*, v. 12, n. 1, p. 25–38, 2019.
- ABUDI, Z. N.; HU, Z.; SUN, N.; XIAO, B.; RAJAA, N.; LIU, C.; GUO, D. Batch anaerobic co-digestion of OFMSW (organic fraction of municipal solid waste), TWAS (thickened waste activated sludge) and RS (rice straw): influence of TWAS and RS pretreatment and mixing ratio. *Energy*, v. 107, p. 131-140, 2016
- AMBROSE, H. W.; PHILIP, L.; SURASHKUMAR, G. K.; KARTHIKAICHAMY, A.; SEN, T. K. Anaerobic co-digestion of activated sludge and fruit and vegetable waste: evaluation of mixing ratio and impact of hybrid (microwave and hydrogen peroxide) sludge pre-treatment on two-stage digester stability and biogas yield. *Journal of Water Process Engineering*, v. 37, p. 101498, 2020.
- ANACLETO, T. M.; KOZLOWSKY-SUZUKI, B.; BJÖRN, A. et al. The methane yield response to pretreatment depends on substrate chemical composition: a meta-analysis in anaerobic digestion systems. *Scientific Reports*, [S. l.], v. 14, p. 1240, 2024.
- ANGELIDAKI, I.; SANDERS, W. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, [S. l.], v. 3, p. 117-129, 2004
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. 5220 chemical oxygen demand (COD). In: *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23. ed. Washington, DC: APHA; AWWA; WEF, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 9896: critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1993
- AZHA, S. F.; SHAHADAT, M.; ISMAIL, S.; ALI, S. W.; AHAMMAD, S. Z. Perspectiva de revestimentos adsorventes flexíveis à base de argila como técnica de produção mais limpa no tratamento de águas residuais: desafios e questões. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2021.
- BALMANT, W. **Concepção, construção e operação de um biodigestor e modelagem matemática da biodigestão anaeróbica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2009.
- BARCELOS, B. R. **Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos**. 2009. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília, 2009

BARROS MAMBELI S, R.; TIAGO FILHO, G. L.; DA SILVA, T. R. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. *Energy Policy*, v. 65, p. 150-164, 2014

BEHL, M.; DAHIYA, P.; KUMARI, D.; THAKUR, K.; DEVI, M.; RATHOUR, R. K.; BHATT, A. K.; BHATIA, R. K. (2023). Development of tailored bioprocess for pretreatment and saccharification of corn stalk into bioethanol using hydrolytic enzymes cocktail and fermentative yeasts. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, Volume 53, 2023, 102896, ISSN 1878-8181

BELLA, K.; RAO, P. V. Anaerobic digestion of dairy wastewater: effect of different parameters and co-digestion options—a review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 13, p. 2527–2552, 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Setor de fruticultura se destaca nas exportações brasileiras. Brasília: MAPA, 2024.

BURANOV, A. U.; MAZZA, G. Lignin in straw of herbaceous crops. *Industrial Crops and Products*, v. 28, n. 3, p. 237–259, 2008.

CARVALHO, A.; R. FRAGOSO, R.; J. GOMINHO, J.; E. DUARTE, E.; Effect of Minimizing d-Limonene Compound on Anaerobic Codigestion Feeding Mixtures to Improve Methane Yield. *Waste Biomass Valor*, [s.l], p. 1-9, 2017.

CASSINI, S. T. (Coord.). Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do Biogás. Rio de Janeiro: ABES/Rima, 2003. 210 p. (Projeto PROSAB).

CATARINO, R. P. F. SEIBEL, N. F. Elaboração e caracterização de farinha de casca de maracujá para aplicação em biscoitos. **Tópicos em ciências e tecnologia de alimentos: resultados de pesquisas acadêmicas** – Volume 3, 2016.

CHANDRA, R. P.; BURA, R.; MABEE, W. E.; BERLIN, A.; PAN, X.; SADDLER, J. N. Substrate pretreatment: the key to effective enzymatic hydrolysis of lignocellulosics? *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, Berlin, v. 108, p. 67–93, 2007

CHAVES, T.C., Gois, G.N.S.B., Peiter, F.S. *et al.* Biohydrogen production in an AFBR using sugarcane molasses. *Bioprocess Biosyst Eng* **44**, 307–316 (2021)

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios*. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 1997. v. 5.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios*. 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2015. v. 5.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. *Reatores anaeróbios*. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. *Reatores anaeróbios*. 2. ed. ampl. e atual. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2019.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos *et al.* Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. *Environmental Science and Biotechnology*, v. 14, n. 4, p. 649–679, 2015.

CHEZEAU, Benoît; VIAL, Christophe. **Modeling and simulation of the biohydrogen production processes**. In: PANDEY, Ashok; MOHAN, S. Venkata; CHANG, Jo-Shu; HALLENBECK, Patrick C.; LARROCHE, Christian (eds.). *Biohydrogen*. 2. ed. Amsterdam: *Elsevier*, 2019. p. 445–483. (Biomass, Biofuels, Biochemicals)

CHONG, J. W. R.; YEW, G.Y.; KHOO, K. S.; HO, S.; SHOW, P. L.. Recent advances on food waste pretreatment technology via microalgae for source of polyhydroxyalkanoates. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 293, p. 112782, 2021

CIBIOGÁS – CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. *Produção de biogás: o que são biodigestores e como gerar biogás*. 2026

CIBIOGÁS Panorama do Biogás no Brasil 2021. (Brasil) *Relatório Técnico nº 001/2022*. Foz do Iguaçu: CIBiogás, 2022

CIBIOGÁS (Brasil). Panorama do biogás no Brasil 2025: *relatório técnico nº 001/2026*. Foz do Iguaçu: Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás (CIBiogás), 2026.

COLLERAN, E.; FINNEGAN, S.; LENS, P. *Anaerobic treatment of sulphate-containing waste streams*. Antonie van Leeuwenhoek, 1995.

CREMONEZ, P. A.; TELEKEN, J. G.; MEIER, W. T. R.; ALVES, H. J. Two-Stage anaerobic digestion in agroindustrial waste treatment: A review. *Journal of Environmental Management*. V. 281, ID 111854, mar. 2021.

CYPRIANO, D. Z.; DA SILVA, L. L.; MARIÑO, M. A.; TASIC, L. A Biomassa da Laranja e seus Subprodutos. *Revista Virtual Química*, [s.l.], v. 9, n. 1, p. 176-191, 2017.

DE AZEVEDO, G. C.; DOS SANTOS, G. T. C.; CATTELAN, M. G. Projeto de um reator em batelada para produção de leite sem lactose utilizando a enzima β -galactosidase. *Revista Científica Unilago*, [S. l.], 2023, .

DECHRUGSA, S.; KANTACHOTE, D.; & CHAIPRAPAT, S. Effects of inoculum to substrate ratio, substrate mix ratio and inoculum source on batch co-digestion of grass and pig manure. *Bioresource technology*, v. 146, p. 101-108, 2013.

DE FARIAS SILVA, C. E., GOIS, G. N. S. B., ABUD, A. K. S., AMORIM, N. C. S., GIROTTO, F., MARKOU, G., ... & AMORIM, E. L. Anaerobic Digestion: Biogas Production from Agro-industrial Wastewater, Food Waste, and Biomass. In Prospects of Renewable Bioprocessing in Future Energy Systems (pp. 431-470). *Springer*, Cham, 2019.

DEMICHELIS, F.; TOMMASI, T.; DEORSOLA, F. A.; MARCHISIO, D.; FINO, D. Effect of inoculum origin and substrate-inoculum ratio to enhance the anaerobic digestion of organic fraction municipal solid waste (OFMSW). *Journal of cleaner production*, v. 351, n. 131539, p. 131539, 2022

DOLL, M. M. R., & FORESTI, E. Effect of the sodium bicarbonate in the treatment of vinasse in AnSBBR operated at 55 and 35°C. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 15, 275 282, 2010.

DOMINGOS, Heloisa Vital. **Produção metanogênica a partir da codigestão anaeróbia de silagem de capim elefante com vinhaça em reator em batelada**. 2022. Dissertação (Mestrado

em Recursos Hídricos e Saneamento) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2022

DUBOIS, M.; GILLES, K. A.; HAMILTON, J. K.; REBERS, P. A.; SMITH, F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, Washington, v. 28, n. 3, p. 350-356, 1956

ELAZHAR, M.; BOUCHABCHOUB, A.; ELAZHAR, F.; ELMIDAOU, A.; TAKY, M. Influence of volatile fatty acids/alkalinity ratio on methane production during mesophilic anaerobic digestion: stability, efficiency and optimization. *Desalination and Water Treatment*, v. 257, p. 142–149, 2022

ELGARAHY, A. M.; ELOFFY, M. G.; ALENGBAWY, A.; EL-SHERIF, D. M.; GABALLAH, M. S.; ELWAKEEL, K. Z.; EL-QELISH, M.. Sustainable management of food waste; pre-treatment strategies, techno-economic assessment, bibliometric analysis, and potential utilizations: *A systematic review. Environmental Research*, [S. l.], v. 225, p. 115558, 2023.

EMRICH, Ayana Lemos. **Ferramenta computacional para gerenciamento de lodo e melhoria de desempenho de reatores UASB tratando esgoto doméstico**. 2021. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FRN). **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. 5ª edição, Gülzow, Alemanha, 2013

FERNÁNDEZ-PONCE, M. T.; PARJIKOLAEI, B. R.; LARI, H. N.; CASAS, L.; MANTELL, C.; DE LA OSSA, E. J. M. Pilot-plant scale extraction of phenolic compounds from mango leaves using different green techniques: kinetic and scale up study. *Chemical Engineering Journal*, v. 299, p. 420-430, 2016.

FERRAZ JUNIOR, A. D. N.; Etchebehere, C.; Perecin, D.; Teixeira, S.; Woods, J. Advancing anaerobic digestion of sugarcane vinasse: current development, struggles and future trends on production and end-uses of biogas in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 2022

FERREIRA, L. R. A.; OTTO, R. B.; SILVA, F. P.; DE SOUZA, S. N. M.; DE SOUZA, S. S.; ANDO JUNIOR, O. H. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 94, p. 440-455, 2018.

FILHO, W. B. DO N.; FRANCO, C. R. Avaliação do potencial dos resíduos produzidos através do processamento agroindustrial no Brasil. *Revista Virtual de Química*, v. 7, n. 6, p. 1968–1987, 3 jul. 2015.

FOGLER, H. S. **Elementos de Engenharia das Reações Químicas**. 4 ed. 1939. Traduzido em Rio de Janeiro: LTC, 2018.

FORGACS, G.; MOHAMMAD POURBAFRANI, M.; NIKLASSON, C.; TAHERZADEHA, M. J.; HOV'ATHA, I. S. A. Methane production from citrus wastes: process development and cost estimation. *Journal of Chemical Technology Biotechnology*, [s.l.], v. 87, n.250-255, 2012.

FREIRE NETO, J. M. **Aplicação de pré-tratamentos ácidos e alcalinos para produção de bio-hidrogênio e bioetanol a partir das cascas da mandioca (manihot esculenta)**. 2023. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.

GALLEGO-GARCÍA, M.; MORENO, A. D.; MANZANARES, P.; NEGRO, M. J.; DUQUE, A. Recent advances on physical technologies for the pretreatment of food waste and lignocellulosic residues. *Bioresource Technology*, [S. l.], v. 369, p. 128397, 2023.

GARBA, Abdurrahman, Biomass Conversion Technologies for Bioenergy Generation: An Introduction. *IntechOpen*, [s. l.], p. 1-17, 2020.

GARCIA, Carolina Gil. **Reator termofílico acidogênico/sulfetogênico seguido de reator metanogênico para tratamento de água residuária rica em sulfato**. 2018. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

GLINWONG, T.; WONGCHANG, T. Syngas production from biomass by linear heart gasifier. *Energy Procedia*, v. 138, p. 762–765, 2017.

GOIS, G. N. S. B. **Codigestão do caldo de capim elefante BRS-Capiaçu com efluente de suinocultura visando a produção de metano**. 2023. 101 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.

GOIS, G. N. S. B. **Produção de hidrogênio e metano a partir da vinhaça de cana-de açúcar em reatores anaeróbios de leito fluidizado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2017.

GU, Y.; CHEN, X.; LIU, Z.; ZHOU, X.; ZHANG, Y. Effect of inoculum sources on the anaerobic digestion of rice straw. *Bioresource technology*, v. 158, p. 149–155, 2014.

GUERI, M. V. D.; SOUZA, S. N. M.; KUCZMAN, O. Parâmetros operacionais do processo de digestão anaeróbia de resíduos alimentares: uma revisão. *BIOFIX Scientific Journal*, Curitiba, v. 3, n. 1, p. 17-25, 2018.

HARIRCHI, S.; WAINAINA, S.; SAR, T.; NOJOURI, S. A.; PARCHAMI, M.; PARCHAMI, M.; VARJANI, S.; KHANAL, S. K.; WONG, J.; AWASTHI, M. K.; *et al.* Microbiological insights into anaerobic digestion for biogas, hydrogen or volatile fatty acids (VFAs): a review. *Bioengineered*, v. 13, n. 3, p. 6521–6557, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção agrícola municipal: culturas temporárias e permanentes 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção de manga. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção de maracujá. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. *World energy outlook 2021*. Paris: IEA Publications, 2021.

INTERNATIONAL GAS UNION – IGU. *Global renewable and low-carbon gas report: 2021 edition*. Surrey: IGU, 2021.

ISMAIL, M. A.; DUBDUB, I.; MOUSA, S.; ZAID, Z. A. A.; ALFAIAD, M. A. Characterization, Combustion Behaviour, and Kinetic and Thermodynamic Modelling of Mango Peel as a Potential Biomass Feedstock. *Polymers*, v. 17, n. 13, p. 1799, 2025

JAIN, S.; JAIN, S.; WOLF, I. T.; LEE, J.; TONG, Y. W. A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 52, p. 142-154, 2015

JESUS, O. N. de; LIMA, L. K. S.; OLIVEIRA, F. O. de P. Substratos para a produção de mudas no sistema orgânico de produção do maracujazeiro azedo. Cruz das Almas: *Embrapa Mandioca e Fruticultura*, 2025.

JUNIOR B., A. C.; CRUZ, A. J. G. **Reatores químicos e bioquímicos: um texto introdutório**. São Carlos: EdUFSCar, 2013. (Coleção UAB-UFSCar – Engenharia Ambiental).

KARKI, R.; CHUENHART, W.; SURENDRA, K. C.; SHRESTHA, S.; RASKIN, L.; SUNG, S.; HASHIMOTO, A.; KHANAL, K. S. Anaerobic co-digestion: Current status and perspectives. *Bioresource Technology*, v. 330, Article ID 125001, jun. 2021.

KIM, Jin-Woo; KIM, Kyoung Seob; LEE, Jin-Suk; PARK, Sung Min; CHO, Hwa-Young; PARK, Jae Chan; KIM, Jun Seok. Two-stage pretreatment of rice straw using aqueous ammonia and dilute acid. *Bioresource Technology*, Amsterdam, v. 102, n. 19, p. 8992–8999, 2011

KIM, M.; GOMEZ, C Y; AHN, Y.; SPEECE, R. E., Hydrolysis and acidogenesis of particulate organic material in mesophilic and thermophilic anaerobic digestion. *Environmental Technology*, v. 24, 2003

KIRK, D. M.; GOULD, M. C. Bioenergy and anaerobic digestion. In: *Bioenergy*. 2. ed. [s.l.] : Elsevier, 2020. p. 335–360.

KEFALEW, T.; TILINTI, B.; BETEMARIYAM, M. The potential of biogas technology in fuelwood saving and carbon emission reduction in Central Rift Valley, Ethiopia. *Heliyon*, 2021.

KUMAR, A. N.; SARKAR, O.; CHANDRASEKHAR, K. et al. Upgrading the value of anaerobic fermentation via renewable chemicals production: a sustainable integration for circular bioeconomy. *Science of the Total Environment*, 2022.

KUNZ, A.; HIGARASHI, M. M.; OLIVEIRA, P. A. V. Tecnologia para tratamento de resíduos animais: biodigestão e compostagem. In: PALHARES, J. C. P.; GEBLER, L. Gestão Ambiental na Agropecuária. Brasília – DF. EMBRAPA, v. 2. p. 235-283. 2014

KUNZ, Airton; STEINMETZ, Ricardo Luis Radis; AMARAL, André Cestonaro do (ed.). **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. 2. ed. Concórdia, SC: Sbera; Embrapa Suínos e Aves, 2022. 211 p.

LAY, J. J.; LEE, Y. J.; NOIKE, T. Feasibility of biological hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste. *Water Research*, v. 33, n. 11, p. 2579-2586, 1999.

LI, K.; LIU, R.; SUN, C. A review of methane production from agricultural residues in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 54, p. 857-865, 2016.

LIMA, Heleno Quevedo de. **Determinação de parâmetros cinéticos do processo de digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos de Santo André – SP por meio de testes do potencial bioquímico de metano**. 2016. 153 f. Tese (Doutorado em Energia) – Universidade Federal do ABC, Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Santo André, 2016.

LIMA, João Ricardo F. de. **Atualização dos dados sobre a cultura da manga com dados da PAM/IBGE até 2024**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2025. (Observatório de Mercado da Manga da Embrapa Semiárido)

LINYI, C.; YUJIE, Q.; BUQING, C.; CHENGLONG, W.; SHAOHONG, Z.; RENGLU, C.; SHAOHUA, Y.; LAN, Y.; ZHIJU, L. Enhancing degradation and biogas production during anaerobic digestion of food waste using alkali pretreatment. *Environmental Research*, [S. l.], v. 188, p. 109743, 2020.

LOPEZ, G.; KEINER, D.; FASIHI, M.; KOIRANEN, T.; BREYER, C. From fossil to green chemicals: sustainable pathways and new carbon feedstocks for the global chemical industry. *Energy & Environmental Science*, v. 16, n. 7, p. 2879–2909, 2023

LUCENA, T. V. **Avaliação da geração de biogás sob Diferentes condições de biodegradação de Resíduos alimentares**. 2016. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

LUNA-AVELAR, K. D.; BARRENA, R.; FONT, X.; SÁNCHEZ, A.; SANTOS-BALLARDO, D. U.; GERMÁN-BÁEZ, L. J.; VALDEZ-ORTIZ, A. A preliminary assessment of anaerobic co-digestion potential of mango and microalgal residue biomass using a design of experiments approach: effect of thermal, physical and biological pretreatments. *Food and Bioprocess Technology*, v. 128, p. 143–152, 2021

MAGALHÃES, A. P. T. **Biogás: um projeto de saneamento urbano**. São Paulo: Nobel, 1986. 120 p.

MAILLACHERUVU, K. Y.; PARKIN, G. F.; PENG, C. Y.; KOESTER, I. W. *Sulfide toxicity in anaerobic systems*. *Water Environment Research*, 1993

MAINTINGUER SI, Fernandes BS, Duarte ICS et al (2008) Fermentative hydrogen production by microbial consortium. *Int J Hydrogen Energy* 33:4309–4317

MANKAR, Akshay R.; PANDEY, Ashish; MODAK, Arindam; PANT, K. K. Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. *Bioresource Technology*, [S. l.], v. 334, p. 125235, 2021.

MARÇAL, S.; VILAS-BOAS, A. A.; CAMPOS, D. A.; PINTADO, M. Effect of freeze drying, hot air drying, and hot air drying preceded by freezing on phytochemical composition, antioxidant capacity, and technological properties of mango peels. *Foods*, v. 15, n. 2, art. 333, 2026

MARTINS, Márcia Eduarda Rodrigues. **Potencial de produção de biogás com mistura de lodo de esgoto e resíduos provenientes da atividade de avicultura de postura**. 2023. 30 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.

MCCANN, M. C.; CARPITA, N. C. Biomass recalcitrance: a multi-scale, multi-factor and conversion-specific property. *Journal of Experimental Botany*, v. 66, n. 14, p. 4109-4118, 2015

MELETTI, L. M. M. Avanços na cultura do maracujá no Brasil. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 33, n. spe1, p. 83–91, 2011.

MERINO-STAND, L. et al. Energy and exergy assessment of a combined supercritical Brayton cycle-ORC hybrid system using solar radiation and coconut shell biomass as energy source. *Renewable Energy*, v. 175, p. 119–142, 2021.

METCALF; EDDY. Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse. 4. ed. rev. New York: **McGraw-Hill**, 2003. 1819 p.

MIRMOHAMADSADEGHI, S.; KARIMI, K.; TABATABAEI, M.; AGHBASHLO, M. Biogas production from food wastes: A review on recent developments and future perspectives. *Bioresource Technology Reports, Elsevier*, n. 7, v. 100202, 2019.

MONTAÑÉS, R.; PÉREZ, M.; SOLERA, R. Anaerobic mesophilic co-digestion of sewage sludge and sugar beet pulp lixiviation in batch reactors: Effect of pH control. *Chemical Engineering Journal*, v. 255, p. 492–499. 2014

MONTGOMERY, L.F.R., Bochmann, G., 2014. Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production. IEA *Bioenergy*, Paris..2014

MUSSATTO, S. I. Biomass Fractionation Technologies for a Lignocellulosic Feedstock Based Biorefinery. Amsterdam: *Elsevier*, 2016.

MUYZER, G.; STAMS, A. J. M. The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria. *Nature Reviews Microbiology*, 2008.

NASCIMENTO FILHO, W. B. do. FRANCO, C. R. Avaliação do Potencial dos Resíduos Produzidos Através do Processamento Agroindustrial no Brasil. *Revista Virtual de Química*. Vol 7. Boa Vista-RR 2015

NESHAT, S. A., MOHAMMADI, M., NAJAFPOUR, G. D., & LAHIJANI, P. Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 308-322, 2017.

NGOMA, P. M.; HILIGSMANN, S.; ZOLA, E. S.; CULOT, M.; FIEVEZ, T.; THONART, P. Comparative study of the methane production based on the chemical compositions of *Mangifera indica* and *Manihot utilissima* leaves. *Springer Plus*, v. 4, n. 1, p. 75, 2015

OBAIDEEN, K. et al. Biogas role in achievement of the sustainable development goals: evaluation, challenges, and guidelines. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, v. 131, p. 104207, 2022.

OLATUNJI, K. O.; AHMED, N. A.; OGUNKUNLE, O. Optimization of biogas yield from lignocellulosic materials with different pretreatment methods: a review. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, v. 14, n. 159, 2021.

OLIVEIRA, E. M. S. **Caracterização de rendimento das sementes e do albedo do maracujá para aproveitamento industrial e obtenção da farinha da casca e pectina**. 2009. 147 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2009

OLIVEIRA, J. R.; LOPEZ A. L. **Produção de Biogás a partir de Tratamento Anaeróbico de Águas Residuais Agro-Industriais**, Biogás, Dr. Sunil Kumar (Ed.), 2012

OLIVEIRA, P. A.V.; HIGARASHI, M. M. Geração e utilização de biogás em unidade de produção de suínos. Série Documentos n. 115. *Embrapa Suínos e Aves: Concórdia*, 2006

OTTO, P., Puchol-Royo, R., Ortega-Legarreta, A. *et al.* Comparação multivariada de dados taxonômicos, químicos e operacionais de 80 diferentes sistemas de digestores anaeróbios em escala real. *Biotechnol Biofuels* 17 , 84 (2024).

OVERMEIRE, A.; LENS, P.; VERSTRAETE, W. *Mass transfer limitation of sulfide in anaerobic biotreatment*. *Water Research*, 1994.

OWEN, W. F.; STUCKEY, D. C.; HEALY JR., J. B.; YOUNG, L. Y.; MCCARTY, P. L. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. *Water Research*, [s.l.], v. 13, n. 6, p. 485-492, 1979

QUINTERO, M.; CASTRO, L.; ORTIZ, C.; GUZMÁN, C.; ESCALANTE, H. Enhancement of starting up anaerobic digestion of lignocellulosic substrate: fique's bagasse as an example. *Bioresource technology*, v. 108, p. 8–13, 2012.

RAMALHO, André. Produção de biogás mais que dobra em 5 anos no Brasil; veja os estados com mais usinas. *Eixos*, 5 set. 2023.

RANDOLPHO, Gabriela Arelhano; AMARAL, Luane Aparecida do; ARELHANO, Letícia Egidio; SANTOS, Elisvânia Freitas dos. Resíduos de frutas transformados em novos produtos alimentícios: uma revisão sistemática. *Multitemas*, Campo Grande, v. 25, n. 61, p. 297-311, 2020

RAVENDRAN, R. R.; ABDULRAZIK, A.; ZAILAN, R. Aspen Plus simulation of optimal biogas production in anaerobic digestion process. *Sci. Eng.*, [s. l.], p. 1 9. 2019.

RAZA, S.; ZHANG, J.; ALI, I.; LI, X.; LIU, C. Tendências recentes no desenvolvimento de polímeros à base de biomassa a partir de recursos renováveis e suas aplicações ambientais. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2020.

RIBEIRO, Gabriel Silva. **Avaliação de pré-tratamentos em resíduos agroindustriais visando à geração de biogás em reatores anaeróbios em batelada**. 2022. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Rio Claro, 2022.

RINCON-PÉREZ, J.; CELIS, L. B.; MORALES, M.; ALATRISTE-MONDRAGÓN, F.; TAPIA-RODRÍGUEZ, A.; RAZO-FLORES, E. Improvement of methane production at alkaline and neutral pH from anaerobic co-digestion of microalgal biomass and cheese whey. *Biochemical Engineering Journal*, v. 169, 2021.

RISQI, L. B.; BUDIASTUTI, M. T. S.; ROSARIASTUTI, R. Potential fruit and vegetable waste as laundry liquid waste treatment. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 1165, p. 012001, 2023.

ROSA, M. F. et al. Valorização de resíduos da agroindústria. In: **Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais**. Anais... Foz do Iguaçu: SBERA, 2011. p. 98-105

SALIHU, A. & ALAM, M. Z. Pretreatment Methods of Organic Wastes for Biogas Production. *Journal of Applied Sciences*, ANSINET, n. 16 (3), p. 124-137, 2016.

SAMBUSITI, C.; MONLAU, F.; FICARA, E.; CARRÈRE, H.; MALPEI, F. A comparison of different pre-treatments to increase methane production from two agricultural substrates. *Applied Energy*, v. 104, p. 62–70, 2013.

SAMPAIO, I. da S. FERST, E. M. OLIVEIRA, J. C. de C. A ciência na cozinha: reaproveitamento de alimentos - nada se perde tudo se transforma. **Experiências em Ensino de Ciências**, V.12, No.4 2017

SANCHEZ-CAMARGO, A. D. P.; GUTIERREZ, L. F.; VARGAS, S. M.; MARTINEZ-CORREA, H. A.; PARADA-ALFONSO, F.; NARVAEZ-CUENCA, C. E. Valorisation of mango peel: proximate composition, supercritical fluid extraction of carotenoids, and application as an antioxidant additive for an edible oil. *The Journal of Supercritical Fluids*, v. 152, p. 104574, 2019

SANTOS, I. F. S. dos; VIEIRA, N. D. B.; NOBREGA, L. G. B. de; BARROS, R. M.; FILHO, G. L. T. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: impact on energy generation, use, and emissions abatement. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 131, p. 54-63, 2018

SANTOS, Liliana Andréa dos. **Potencial de geração de biogás a partir de resíduos agroindustriais de frutas**. 2019. 185 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

SANTOS, L. A.; VALE NÇA, R. B.; SILVA, L. C. S.; HOLANDA, S. H. B.; SILVA, A.F.V. JUCÁ, J. F. T.; SANTOS, A. F. M. S. Methane generation potential through an aerobic digestion of fruit waste. *Journal of Cleaner Production*, [s.l], v. 256, p. 120389, 2020

SANTOS, I. V. V. S. **Biodigestão anaeróbia dos resíduos da agroindústria de citrus**. 2016. 47 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Energia da Biomassa) - Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2016.

SANTOS, L. A.; et al. Aproveitamento energético de bagaço de laranja e casca de maracujá *in natura* da agroindústria de suco para produção de metano. In: **congresso internacional das ciências agrárias – cointer pdvagro**, Recife, 2021

SANTOS, Maria Helena Oliveira. Desperdício de alimentos e sua interferência no meio ambiente. **Instituto Construir e Conhecer**. Goiânia, n.5, 2008

SANTOS, R. B. et al. Manejo sustentável do maracujazeiro. práticas e desafios. *Revista Extensão Rural*, v. 28, n. 2, p. 60–66: 2022.

SHANMUGAM, S.; SEKAR, M.; SIVARAMAKRISHNAN, R. et al. Pretreatment of second and third generation feedstock for enhanced biohythane production: challenges, recent trends and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021.

SHARMA, H. K.; XU, C.; QIN, W. Biological pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuels and bioproducts: an overview. *Waste and Biomass Valorization*, v. 10, n. 2, p. 235–251, 2019.

SILVA, A. F. V.; SANTOS, L. A.; VALENÇA, R. B.; PORTO, T. S.; MOTTA, M. A. S.; GOMES, G. J. C.; JUCÁ, J.F.T.; SANTOS, A. F. M. S. Cellulase production to obtain biogas from passion fruit (*Passiflora edulis*) peel waste hydrolysate. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s.l], v. 7, n. 6, p. 103510, 2019.

SILVA, A. F. V.; SANTOS, L. A.; VALENÇA, R. B.; PORTO, T. S.; MOTTA SOBRINHO, M. A.; GOMES, G. J. C.; JUCÁ, J. F. T.; SANTOS, A. F. M. S. Cellulase production to obtain biogas from passion fruit (*Passiflora edulis*) peel waste hydrolysate. *Waste and Biomass Valorization*, v. 10, n. 10, p. 3003–3015, 2019

SILVA, Olga Eliza Rocha e. **Produção de biogás a partir da co-digestão anaeróbia de capim elefante com vinhaça em reator em batelada**. 2020. 87 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.

SILVA, T. H. L.; SANTOS, L. A.; CAROLINNI ROBERTA DE MELO OLIVEIRA, C. R. M.; PORTO, T. S.; JUCÁ, J. F. T.; SANTOS, A. F. M. S. Determination of methane generation potential and evaluation of kinetic models in poultry wastes. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, [s.l], v. 32, p. 101936, 2021

SLOPIECKA, K.; LIBERTI, F.; MASSOLI, S.; BARTOCCI, P.; FANTOZZI, F. Chemical and physical characterization of food waste to improve its use in anaerobic digestion plants. **Energy Nexus**, v. 5, p. 100049, 2022.

SONG, Z.; LIU, X.; YAN, Z.; YUAN, Y.; LIAO, Y. Comparison of seven chemical pretreatments of corn straw for improving methane yield by anaerobic digestion. **PLoS ONE**, v. 9, n. 4, e93801, 2014.

SOOD, S.; SINGHAL, R.; BHAT, S.; KUMAR, A. Inoculum Preparation. In: MOO YOUNG, M. (Ed.). **Comprehensive Biotechnology**. San Diego, CA: Elsevier, 2011. p. 151–164.

SOUSA, IdP; Rosa, AP; Almeida, GK; Rocha, DN; Neves, TdA; Borges, AC. Avaliação integrada da produção de metano a partir da codigestão de águas residuais suínas e outros resíduos orgânicos. *Sustainability* 2024, 16, 5938.

SUKSONG, W.; MAMIMIN, C.; PRASERTSAN, P.; KONGJAN, P.; O-THONG, S. Effect of inoculum types and microbial community on thermophilic and mesophilic solid-state anaerobic

digestion of empty fruit bunches for biogas production. **Industrial crops and products**, v. 133, p. 193–202, 2019.

SURYAWANSHI, P. C.; SATYAM, A.; CHAUDHARI, A. B. Integrated strategy to enhance biogas production from mango peel waste. **Global NEST Journal**, v. 15, n. 4, p. 568–577, 2013.

TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F. **Handbook of Solid Waste Management**. Second Edition. 834p. 2002.

TIWARI, S.; BELIYA, E.; VASWANI, M. (2022). Rice Husk: A Potent Lignocellulosic Biomass for Second Generation Bioethanol Production from *Klebsiella oxytoca* ATCC 13182. **Waste Biomass Valor** **13**, 2749–2767 (2022).

TSHIKALANGE, B. et al. Effectiveness of cattle dung biogas digestate on spinach growth and nutrient uptake. **Heliyon**, v. 8, p. e09195, 2022.

VAN LIER, J.B.; TILCHE, A.; AHRING, B. K.; MACARIE, H.; MOLETTA, R.; DOHANYOS, M. New perspectives in anaerobic digestion. **Water Sci Technol.**, v. 43, p. 1-18, 2001.

VASCO-CORREA, Juliana; KHANAL, Sami; MANANDHAR, Ashish; SHAH, Ajay. Anaerobic digestion for bioenergy production: Global status, environmental and technoeconomic implications, and government policies. **Bioresource Technology**, v. 247.2018

WEERACHANCHAI, P.; LEONG, S. S. J.; CHANG, M. W.; CHING, C. B.; LEE, J.-M. Improvement of biomass properties by pretreatment with ionic liquids for bioconversion process. **Bioresource Technology**, v. 111, p. 453-459, 2012

WU, D., LI, L., ZHAO, X., PENG, Y., YANG, P., & PENG, X. Anaerobic digestion: A review on process monitoring. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 103, 1-12, 2019.

WU, D.; PENG, X.; LI, L.; YANG, P.; PENG, Y.; LIU, H.; WANG, X. Commercial biogas plants: Review on operational parameters and guide for performance optimization. *Fuel*, v. 303, Article ID 121282, nov. 2021a.

YANG, D.; ZHENG, Y.; ZHANG, R. Alkali pretreatment of rice straw for increasing the biodegradability. In: 2009 RENO, NEVADA, JUNE 21–24, 2009, Reno. *Proceedings [...]*. Reston: **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 2009. p. 1.

YAO, Y.; BERGERON, A. D.; DAVARITOUCHAEI, M. Methane recovery from anaerobic digestion of urea-pretreated wheat straw. **Renewable Energy**, v. 115, p. 139-148, 2018.

YAO, Z. et al. Biomass gasification for syngas and biochar co-production: energy application and economic evaluation. *Applied Energy*, v. 209, p. 43–55, 2018.

ZAINAL, A. Z. A.; HARUN, R. H. R.; IDRUS, S. I. S. Performance monitoring of anaerobic digestion at various organic loading rates of commercial Malaysian food waste. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, v. 10, art. 775676, 2022

ZHANG, L.; XU, C.; CHAMPAGNE, P. Overview of recent advances in thermo chemical conversion of biomass. **Energy Conversion and Management**, v. 51, p. 969-982, 2010.

ZHANG, Y., LI, J., LIU, F., YAN, H., LI, J., & ZHANG, X. (2018). Reduction of Gibbs free energy and enhancement of Methanosaeta by bicarbonate to promote anaerobic syntrophic butyrate oxidation. **Bioresource technology**, 267, 209-217.

ZHANG, W.; LI, L.; XING, W.; CHEN, B.; ZHANG, L.; LI, A.; LI, R.; YANG, T. Dynamic behaviors of batch anaerobic systems of food waste for methane production under different organic loads, substrate to inoculum ratios and initial pH. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 128, n. 6, p. 733–743. 2019.

ZOGHLAMI, A.; PAËS, G. Lignocellulosic biomass: understanding recalcitrance and predicting hydrolysis. **Frontiers in Chemistry**, v. 7, p. 874, 2019.